



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ENERGETICKÝ ÚSTAV**

ENERGY INSTITUTE

**STUDIUM PROUDĚNÍ NA ROZHRANÍ NEMÍSITEL-  
NÝCH KAPALIN**

STUDY OF THE FLOW AT THE INTERFACE OF IMMISCIBLE LIQUIDS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Filip Lunda**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. Simona Fialová, Ph.D.**

**BRNO 2020**



## Zadaní diplomové práce

Ústav: Energetický ústav  
Student: Bc. Filip Lunda  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Fluidní inženýrství  
Vedoucí práce: doc. Ing. Simona Fialová, Ph.D.  
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### Studium proudění na rozhraní nemísitelných kapalin

#### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Předmětem diplomové práce bude studium chování rozhraní nemísitelných kapalin. Úkolem studenta bude sestavení a provedení experimentu zaměřeného na laminární proudění dvou nemísitelných kapalin, vyhodnocení měření pomocí Particle Image Velocimetry (PIV) a následné ověření jejich chování a interakcí pomocí počítačového modelování.

#### Cíle diplomové práce:

Provedení experimentů na nově vybudované trati pro sledování jevů při proudění dvou nemísitelných kapalin. Pomoc při provedení a vyhodnocení experimentů PIV se dvěma nemísitelnými kapalinami pro různé rychlosti proudění. Sledování rozhraní kapalin a nestabilit na něm. Počítačové modelování sledovaných jevů pomocí komerčních softwarů vhodných pro modelování proudění

#### Seznam doporučené literatury:

MALÁ, K. Studium proudění nemísitelných kapalin, Diplomová práce, VUT v Brně FSI, EU, 2020.

COPPOLA, G. a SEMERARO, O. Interfacial instability of two rotating viscous immiscible fluids in a cylinder. Physics of Fluids [online]. 2011, DOI: 10.1063/1.3599507. ISSN 1070-6631.

AMERI, M. a TIRANDAZ, N. Two phase flow in a wavy core-annular configuration through a vertical pipe: Analytical model for pressure drop in upward flow. International Journal of Mechanical Sciences [online]. 2017, DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2017.03.034. ISSN 00207403.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

# **Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá studiem proudění dvou nemísitelných kapalin v horizontálním potrubí. První část diplomové práce teoreticky popisuje nemísitelné proudění. Následuje experimentální měření, pro které byla upravena zkušební trať pro nátok oleje shora. Za kapaliny byly vybrány voda a olej z kukuřičných klíčků. Na trati bylo pozorováno několik typů režimu toku. Následně bylo popsáno a provedeno PIV měření na zkušební trati, kde se zjišťovaly velikosti vektorů rychlostí. V poslední části práce proběhla simulace jednoho vybraného režimu v programu Ansys Fluent, kdy bylo využito VOF metody. Tento režim se simuloval jak ve 3D, tak ve 2D potrubí. Zjištěné výsledky se porovnaly s experimentálním měřením a kriticky zhodnotily.

## **Klíčová slova**

Proudění nemísitelných kapalin, horizontální potrubí, PIV měření, VOF simulace

## **Abstract**

This theses deals with flow of two immiscible fluids in horizontal pipeline. First part teoretically describes immiscible flow. What follows is experimental measurement in wich experimental track was adjusted for inlet of oil from the top. Water and corn germ oil were used as fluids. There were observed many modes of flow on the track. After that PIV was described and measured. PIV was done for measurement of values of velocity vectors. Simulation of one chosen mode was developed in the last chapter. This simulation was done in Ansys Fluent with help of VOF method. Simulation was done both in 3D and 2D pipeline. In the end these simulation were compared with experiment measurement and were critically evaluated.

## **Key Words**

Flow of immiscible fluids, horizontal pipeline, PIV measurement, VOF simulation

## Bibliografická citace

LUNDA, Filip. *Studium proudění na rozhraní nemísitelných kapalin* [online]. Brno, 2021. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132500>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Simona Fialová.

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma s názvem Studium proudění na rozhraní nemísitelných kapalin vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Simony Fialové, Ph.D. s využitím svých znalostí a uvedených zdrojů.

V Brně dne 20.05.2021

---

Filip Lunda

## Poděkování

Děkuji paní doc. Ing. Simoně Fialové, Ph.D. za její cenné připomínky a rady, které mi poskytla při psaní této práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Ondřeji Urbanovi za rady ohledně numerického modelování proudění. V neposlední řadě chci také poděkovat panu Ing. Martinu Hudcovi za cenné rady během experimentálního měření.



# Obsah

<b>Úvod .....</b>	<b>10</b>
<b>1 Teorie dvoufázového proudění nemísitelných kapalin .....</b>	<b>11</b>
1.1 Fáze.....	11
1.2 Mísení dvou kapalin.....	13
1.3 Proudění nemísitelných kapalin v potrubí .....	16
1.4 Univerzální mapa režimů toku.....	20
<b>2 Experimentální pozorování proudění.....</b>	<b>23</b>
2.1 Volba kapalin .....	23
2.2 Experimentální trať .....	23
2.3 Výsledky experimentu .....	27
2.4 Porovnání přítoků oleje do experimentální trati .....	34
<b>3 Particle image velocimetry (PIV) .....</b>	<b>38</b>
3.1 Princip PIV .....	38
3.2 Částice.....	39
3.3 Světelné zdroje.....	41
3.4 Záznam měření .....	43
3.5 Metody vyhodnocení snímků.....	44
3.6 Stereoskopické PIV.....	44
3.7 Experimentální měření pomocí PIV .....	46
<b>4 Simulace dvoufázového proudění .....</b>	<b>52</b>
4.1 Geometrie.....	52
4.2 Výpočet.....	54
4.3 Výsledky výpočtů .....	54
4.4 Porovnání simulací s PIV .....	58
4.5 Srovnání experimentálních měření .....	61
<b>Závěr.....</b>	<b>62</b>
Seznam použitých zdrojů.....	64
<b>Seznam symbolů .....</b>	<b>67</b>
<b>Seznam obrázků.....</b>	<b>68</b>
<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>70</b>

## Úvod

Proudění dvou nemísitelných kapalin v potrubí je náročným a prozatím nedokonale prostudovaným problémem, který je velmi často pozorován v různých průmyslových odvětvích od proudění v mikrokánálech až po proudění kapalin v petrochemickém průmyslu. V petrochemickém průmyslu můžeme proudění pozorovat v potrubí dopravující ropu z mořského dna až na pevninu, kde dochází ke vstřikování vody do potrubí z důvodů udržení konstantního tlaku. Se stárnutím vrtů dochází ke zvětšování objemu dodávané vody. S ohledem na ekonomická hlediska se teoreticky může vyplatit směs, ve které je až 90% podíl vody. [5,17]

Proto bylo v minulosti bylo provedeno velké množství studií např. Russel (1959) [17], Trallero (1995) [8], Angeli a Hewitt (2000) [2], kteří se pokoušeli popsat proudění nemísitelných kapalin v horizontálním potrubí. Avšak dodnes nedošlo k dokonalému pochopení tohoto komplexního proudění. Při toku kapalin v horizontálním potrubí dochází ke vzniku několika režimů toku, které jsou závislé na typu kapaliny (hustota, viskozita a povrchové napětí), rychlosti proudění a typu potrubí (průměr, sklon, drsnost a smáčivost) [12]. Díky tomu může v každé z kapalin docházet k jinému typu proudění. Celkem může být pozorováno až 9 režimů toků [2], kdy každý má svá specifika. Výzkum tohoto problému může významně pomoci při hledání nových technologií přepravy kapalin.

Diplomová práce přímo navazuje na práci Ing. Malé [14], která se studiu proudění nemísitelných kapalin v minulosti věnovala. Jedním z cílů práce je experimentálně pozorovat proudění na sestavené trati. Dalším cílem je vyhodnotit data z PIV měření, které na trati bylo provedeno, a sledovat proudění a nestability na rozhraní kapalin. Následně provedení numerické simulace a porovnání výsledku s reálně pozorovaným prouděním kapalin.

První kapitola se věnuje teoretickému popisu proudění dvou nemísitelných látek, kde přiblíží mísení kapalin. Na počátku bude objasněn pojem fáze a jeho rozhraní a následně popíšeme proudění nemísitelných kapalin v horizontálním potrubí a uvedeme jednotlivé typy režimů toku.

Druhá kapitola se zaměřuje na experimentální měření, při kterém je pozorován výskyt různých režimů toku. Kapitola se také věnuje volbě kapalin, kdy za nemísitelné kapaliny jsme vybrali vodu a olej z kukuřičných klíčků. Pro měření byla upravena trať s nátokem oleje zespodu. Změna režimu toku byla ovládána změnou vstupních rychlostí kapalin. Změřené výsledky jsou graficky znázorněny a vzájemně porovnány. Závěrečná část kapitoly se věnuje změně typu proudění při různém nátoku kapalin.

Další kapitola popisuje particle image velocimetry (PIV), kde je nejdříve popsán základní princip a jednotlivé části potřebné k jeho úspěšnému provedení. Dále se kapitola věnuje PIV měření, které na trati bylo provedeno. Díky tomuto měření se podařilo získat rychlostní profil.

V závěrečné kapitole je nasimulován jeden režim toku, který byl experimentálně naměřen. Simulace je provedena jak ve 3D, tak ve 2D rozměrech. U 2D je navíc pozorována změna proudění v závislosti na typu nátoku oleje do potrubí. Následně se porovnal rozdíl mezi 2D a 3D simulací s reálně pozorovaným tokem. Toto srovnání bylo provedeno i pro změnu nátoků oleje. Závěrečná část diplomové práce se věnuje srovnání vektorů rychlostí získaných PIV měřeními a numerickou simulací.

## 1 Teorie dvoufázového proudění nemísitelných kapalin

Pro popis dvoufázového proudění nemísitelných kapalin musíme znát jeho teorii. V následujících kapitolách budou popsány fáze mísení dvou kapalin a posléze i proudění nemísitelných kapalin.

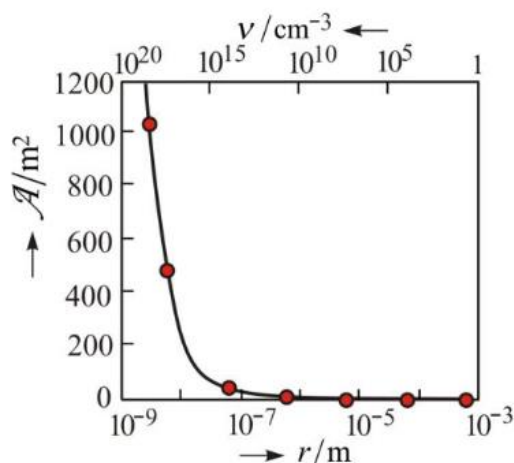
### 1.1 Fáze

Pod pojmem fáze rozumíme část objemu zkoumaného systému, kde jsou jeho vlastnosti konstantní nebo se spojitě mění. Jednotlivé fáze jsou odděleny fázovým rozhraním. Kde z makroskopického hlediska rozumíme fázovým rozhraním oblast, ve které dochází ke skokové změně jedné nebo více vlastností. Z mikroskopického hlediska má rozhraní tloušťku několik molekulárních objemů. Vlastnosti fázového rozhraní ovlivňují obě se fáze. Tyto fáze rozlišujeme podle typu stýkajících se skupenských stavů: [3]

- rozhraní kapalina/plyn (l/g)
- rozhraní kapalina/kapalina(l/l)
- rozhraní pevná látka/plyn (s/g)
- rozhraní pevná látka/kapalina(s/l)
- rozhraní pevná látka/pevná látka (s/s)

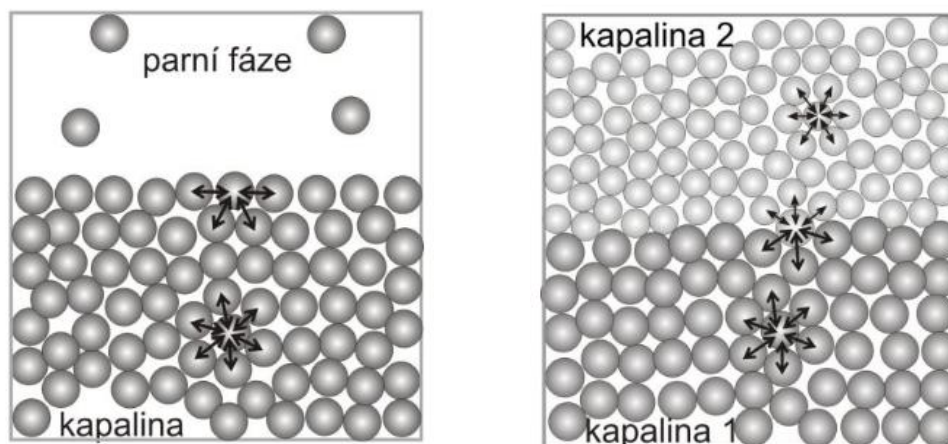
Fázová rozhraní kapalina/plyn (l/g) a pevná látka/plyn (s/g) jsou označována jako povrchy. Různé typy rozhraní mají často některé vlastnosti společné, avšak hlavně se v některých vlastnostech výrazně liší. [3]

U systémů tvořených fázemi makroskopických rozměrů můžeme příspěvky fázových rozhraní ve srovnání s počtem molekul zanedbat. Naopak pokud je poměr povrchu fázového rozhraní významný vzhledem k objemu systému, tak jej zanedbat nesmíme. [22]



Obr. 1: Závislost velikosti plochy fázového rozhraní  $A$  na poloměru  $r$  a počtu částic  $v$  [22]

Pomocí interakcí mezi molekulami různých fází dokážeme vysvětlit vlastnosti jako je povrchová energie a povrchové mezifázové napětí. Tam tyto jevy vznikají tak, že na rozhraních jsou interakce mezi molekulami odlišné od interakcí uvnitř fází. [22]



**Obr. 2:** Molekuly v rozhraní a v objemové fázi [22]

Na obrázcích vidíme změnu působení sil na molekuly na rozhraních. Dále můžeme pozorovat rozdílné síly pro každou z fází. Na obrázku, který popisuje fázové rozhraní mezi parní fází a kapalinou vidíme, že pro malé tlaky můžeme síly od molekul parní fáze vzhledem k jejich velikosti zanedbat. Výslednicí těchto sil je tah do nitra kapaliny. Pomocí těchto znalostí dokážeme vytvořit rovnici pro výpočet povrchové energie.

$$dW^S = \gamma dA \quad (3)$$

Kde  $W^S$  je práce potřebná k zvětšení povrchu kapalné fáze,  $A$  je nově vzniklý povrch a  $\gamma$  je povrchová energie. Při popisu jevů se častěji používá takzvané povrchové napětí. Snahu kapaliny zabránit zvětšení jeho objemu si můžeme představit také tak, jako by ve směru povrchu působila kontraktivní síla. Tuto sílu nazýváme povrchové napětí. Napětí je definováno jako tečná síla, která působí na úsečku jednotkové délky ležící v povrchu. [22]

## 1.2 Mísení dvou kapalin

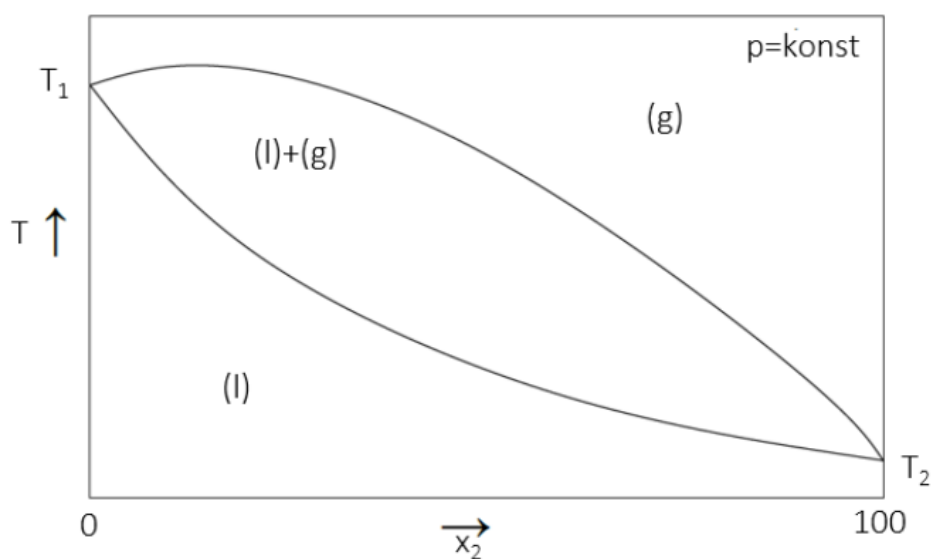
Existují tři možnosti, jak lze kapaliny mísit. První z nich je neomezené mísení kapalin. Další je omezené mísení a posledním jsou nemísitelné kapaliny.

### Neomezené mísení kapalin

Neomezené mísení je situace, kdy nám z dvou různých kapalin vzniká jediná kapalná fáze. Pro tuto situaci můžeme použít Gibbsův fázový zákon. Z tohoto zákona vychází rovnice:

$$v = s + 2 - f = 2 + 2 - 1 = 3 \quad (4)$$

Kde  $v$  je počet neznámých,  $s$  je počet kapalin a  $f$  je počet fází. Z této rovnice vyplývá, že musíme znát tři proměnné (teplotu, tlak a koncentraci jedné ze složek), abychom tuto soustavu plně popsali. Proto se z praktických důvodů popisuje tato situace buď za konstantního tlaku nebo teploty. Díky tomu dokážeme získat dvourozměrný graf popisující chování směsi pro různé koncentrace při různé teplotě nebo při různém tlaku. [21]



**Obr. 3:** Izobarický fázový diagram dvousložkové soustavy dvou neomezeně mísitelných kapalin [21]

Na obrázku je zakreslen průběh dvousložkové soustavy dvou neomezeně mísitelných kapalin pro konstantní tlak. Nacházejí se zde 3 oblasti. První oblast označená l je směs kapaliny. V prostřední oblasti se nachází jak kapalná, tak plynná část. Poslední oblast označená g je plynná.

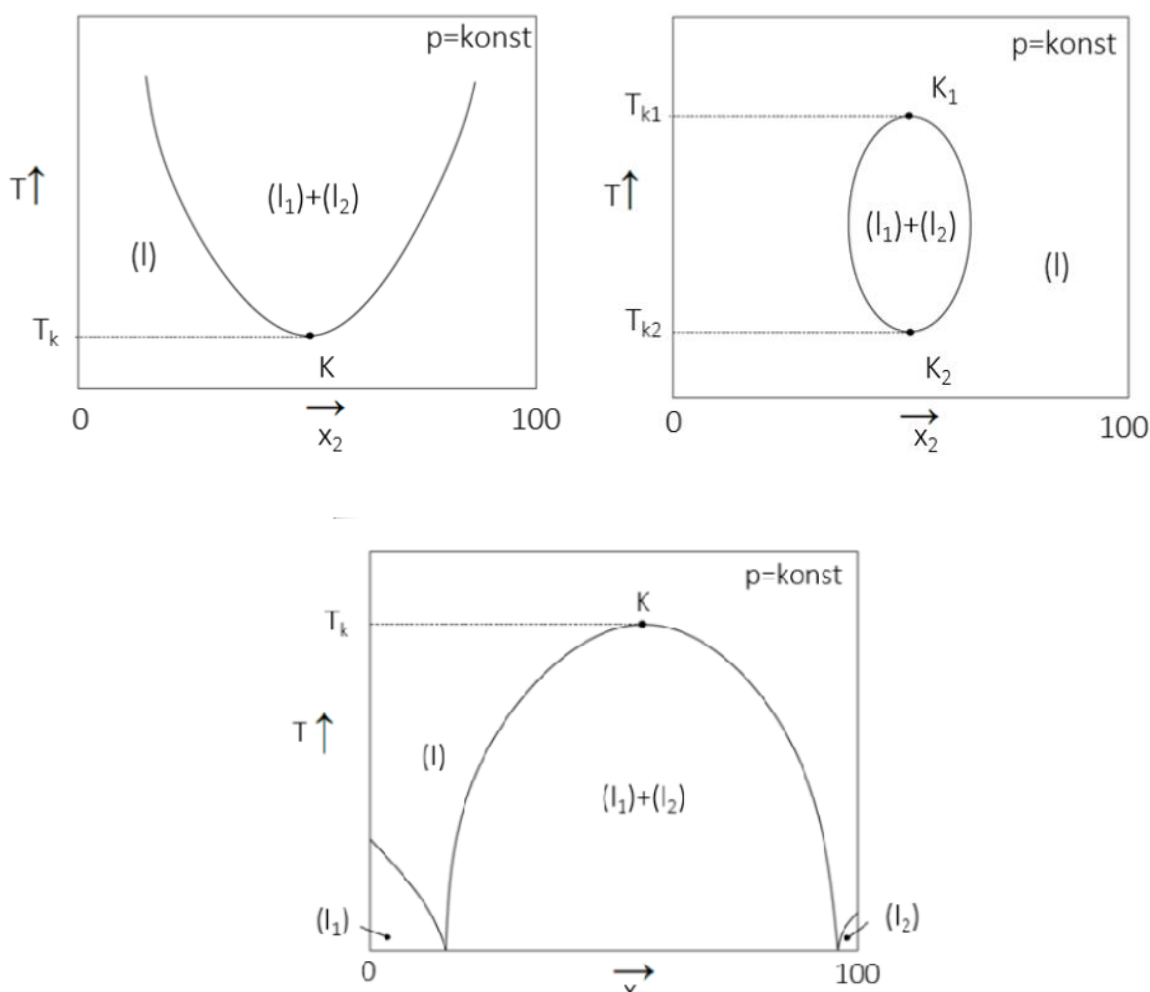
Vidíme, že pro jakoukoli koncentraci nám vychází pouze jedna fáze. Se stoupající teplotou dojde k vzniku plynné části. Pro různé koncentrace dochází k přeměně kapaliny na plyn při různých teplotách. Teploty  $T_1$  a  $T_2$  označují teplotu varu pro čisté kapaliny.

V praxi se objevují výrazné odchylky od ideálního chování. Jednou z takovýchto odchylek je tvorba azeotropických směsí. Tento typ směsi je specifický tím, že plynné složení fáze je

totožné s kapalnou fází. To znamená, že azeotropická směs může mít vyšší nebo nižší teplotu varu než kapalné složky. [21]

### Omezené mísení kapalin

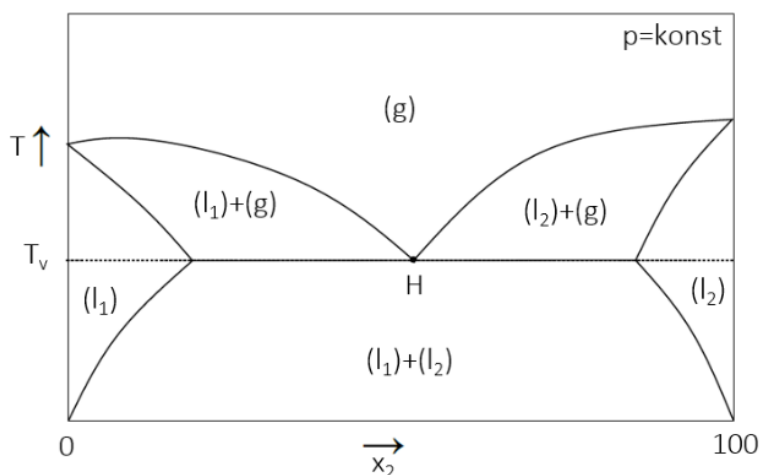
U těchto soustav vzniká takzvaná kritická rozpouštěcí teplota. Pro teploty nižší, než je kritická rozpouštěcí teplota se nám objevují v kapalině dvě nemísitelné fáze. Dále existují ještě další systémy, u kterých se vyskytuje dolní kritická teplota nebo dokonce obě teploty. [21]



**Obr. 4:** Izobarický fázový diagram dvousložkové soustavy dvou omezeně mísitelných kapalin [21]

Jak vidíme, tak první z obrázků má dolní kritickou teplotu. Prostřední má obě kritické teploty a obrázek úplně napravo má horní kritickou teplotu. Při uvažování plynného stavu směsi dochází k celé proměně diagramu. Jednou ze zajímavostí je stejná teplota varu směsi nezávisle

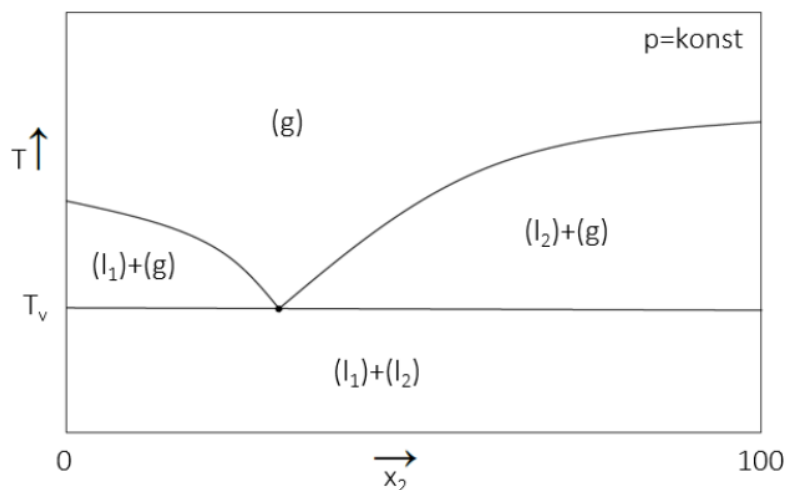
na koncentraci roztoku. Při určité koncentraci dojde k podobné situaci, jaká nastávala u azeotropické směsi. V tomto případě se z důvodu odlišení tento bod značí H a nazývá se heterogenní azeotrop. [21]



**Obr. 5:** Izobarický fázový diagram dvousložkové soustavy dvou omezeně mísitelných kapalin s plynnou fází [21]

### Nemísitelné kapaliny

Poslední situací soustavy dvou kapalin je systém, kdy jsou kapaliny zcela nemísitelné. V tomto případě se fázový diagram výrazně zjednoduší. Avšak v reálu úplná nemísitelnost neexistuje.



**Obr. 6:** Izobarický fázový diagram dvousložkové soustavy dvou nemísitelných kapalin s plynnou fází [21]

Jak z obrázku vidíme, tak tentokrát je existence kapalně a plynné části systému oddělena pro všechny koncentrace rovnoběžkou s osou  $x$ . Tato rovnoběžka se vyskytuje v teplotě varu pro dříve vroucí kapalinu. [21]

### 1.3 Proudění nemísitelných kapalin v potrubí

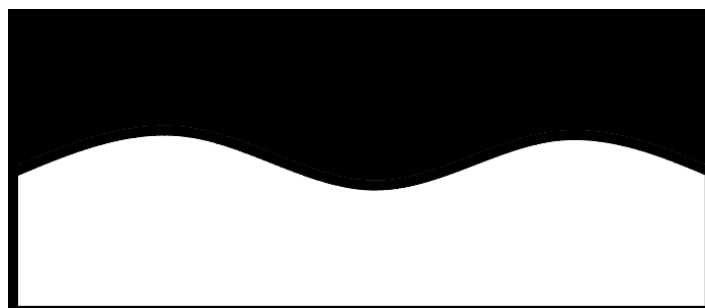
V mé diplomové práci se budu experimentálně a numericky zabývat pozorováním dvoufázového proudění nemísitelných látek v potrubí. Tento typ experimentu je velmi častý. Nejčastěji se s ním setkáme v olejovém průmyslu. Velkou výhodou je, že jej můžeme velmi snadno porovnat s výsledky ostatních vědců ve světě. Pro pozorování proudění se často využívá čiré potrubí, díky kterému můžeme pozorovat změny toku pouhým okem. Hlavním problémem vyskytujícím se v proudění nemísitelných kapalin v potrubí je vznik několika režimů toků. Každý z těchto režimů má jinou charakteristiku proudění. [11]

#### Režimy toku

Klasifikace režimu toků v potrubí se liší pro každý vědecký článek. Tyto rozdíly jsou způsobeny z několika důvodů. Hlavním důvodem je komplexnost samotného dvoufázového proudění. Tato složitost vede k velkému množství režimů. Se zlepšováním vizualizačních metod dochází k identifikaci čím dál větších detailů režimů. [11]

Doposud nedošlo k zavedení jednotné klasifikace režimu toků. V této práci uvádím klasifikaci navrženou Angelim, Hewittem [2] a Trallerem.[18]. Klasifikace je specifická pro dvoufázové proudění nemísitelných kapalin v horizontálním potrubí. [11]

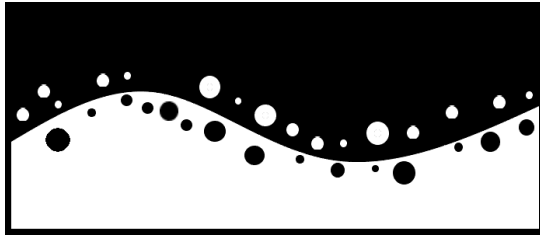
- **Rozvrstvený tok (ST):** Fáze jsou separovány do dvou vrstev, kde kapalina s větší hustotou se nachází dole. Tento typ režimu se dále dělí na rozvrstvený s hladkým rozhraním (SS) a vlnitým rozhraním (SW). Rozdělení je důležité při pozorování přeměny rozvrstveného toku na nerozvrstvený.



*Obr. 7: Rozvrstvený tok [11- upraveno]*

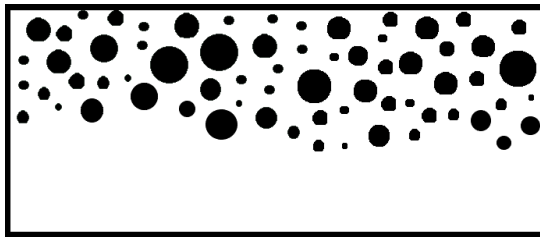


- **Rozvrstvený tok s mícháním na rozhraní (SWD):** V blízkosti rozhraní se vyskytují kapičky druhé kapaliny.



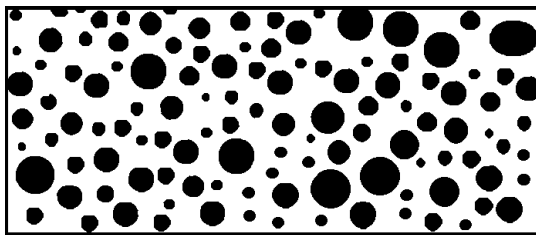
*Obr. 8: Rozvrstvený tok s mícháním na rozhraní [11- upraveno]*

- **Dispergovaný tok:**
  - **Dominance těžší fáze:**
    - **Disperze oleje ve vodě s vodní vrstvou (DOW&W):** Kapičky oleje v horní části potrubí s čistou vodou nacházející se pod olejem.



*Obr. 9: Disperze oleje ve vodě s vodní fází [11- upraveno]*

- **Disperze oleje ve vodě (DO/W):** Kapičky oleje dispergující ve vodě.



*Obr. 10: Disperze oleje ve vodě [11 - upraveno]*

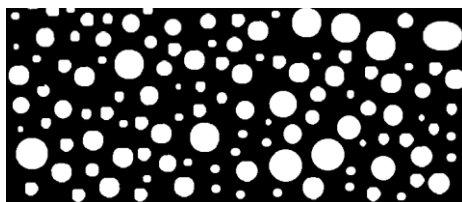
- **Dominance lehčí fáze:**

- **Disperze vody v oleji s olejovou vrstvou (DOW&W):** Kapičky vody v dolní části potrubí s čistým olejem nacházející se nad vodou.



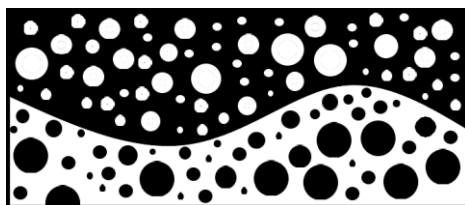
*Obr. 11: Disperze vody v oleji s olejovou vrstvou [11- upraveno]*

- **Disperze vody v oleji (DW/O):** Kapičky vody dispergující v oleji.



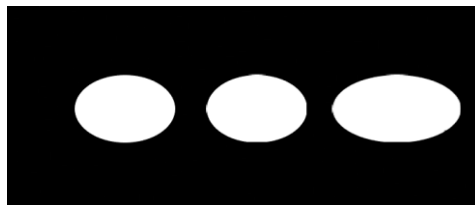
*Obr. 12: Disperze vody v oleji [11- upraveno]*

- **Duální kontinuální tok (DC):** Obě kapaliny jsou kontinuálně oddělené, avšak tentokrát v každé fázi disperguje fáze druhá.



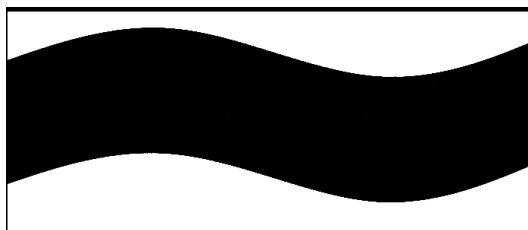
*Obr. 13: Duální kontinuální tok [11- upraveno]*

- **Přerušovaný tok (IT):** V potrubí se vytváří takzvaní slimáci, kteří se pohybují uprostřed toku.



*Obr. 14: Přerušovaný tok [11- upraveno]*

- **Prstencový tok (AN):** S tímto režimem se setkáváme hlavně při použití vysokoviskozitních olejů, kde voda vytvoří prstenec obtékající kolem oleje.



*Obr. 15: Prstencový tok [11- upraveno]*

### Parametry ovlivňující režim toku

Existuje mnoho parametrů, které ovlivňují, jaký režim toku se nám objeví v potrubí. Zde jsou uvedeny nejdůležitější z nich.

- **Viskozita, hustota a povrchové napětí**  
Samotná viskozita nemá vliv na počet režimů, které se v potrubí vyskytují, avšak ovlivňuje, kdy dojde k jejich změně. To znamená, že viskozita mění velikost oblasti, ve které se režim vyskytuje. [6]
- **Rychlost směsi a objemový podíl**  
Pro rychlosti obecně platí, že s malou rychlostí většinou dochází ke vzniku rozvrstveného toku. U velkých rychlostí vzniká dispergovaný tok. Další možností, jak získat dispergovaný tok, je snížení objemového podílu jedné z kapalin. [6]
- **Geometrie proudění a smáčivost materiálu**  
Pomocí geometrie potrubí můžeme ovlivňovat jeho chování. Například tvar na vstupu může ovlivnit proudění natolik, že nám tok udrží déle rozvrstvený nebo jej můžeme navrhnout tak, že nám tok disperguje.  
Smáčivost nám tok může ovlivňovat tak, že materiál potrubí, který je nesmáčivý pro olej, upřednostňuje disperzi vody v oleji a naopak. [6]
- **Tlak a teplota**  
Tlak a teplota mají nepřímý vliv na režim toku. Jejich dopad je v tom, že změnou teploty a tlaku se mění vlastnosti kapalin. [6]

## **Změna režimu toku**

Dvoufázový tok je pro malé rychlosti obou fází zpočátku rozvrstvený s hladkým rozhraním. Po zvýšení rychlosti začnou vznikat na rozhraní vlny. Vlnová délka je přibližně dvojnásobkem průměru potrubí. [19] Pokud rychlost ještě více zvyšujeme, tak se na rozhraní začnou vytvářet kapičky druhé fáze. V tomto momentě dochází k překonání gravitační síly dynamickou silou. Díky tomu se tyto kapičky drží blízko rozhraní. Z přechodu z rozvrstveného na disperzní tok dochází díky vzniku nestabilitě toku. Tato nestabilita nastává díky významnému rozdílu tangenciálních rychlostí nebo díky velkému nárustu viskozity v rozhraní. [6]

## **Fázová inverze**

Speciálním fenoménem objevujícím se u nemísitelných kapalin je takzvaná fázová inverze. Tento jev lze popsat jako moment, kdy dojde k přechodu dispergované jedné fáze na kontinuální fázi. To je okamžik, kdy dojde k přeměně režimu disperze vody v oleji (DW/O) na režim disperze oleje ve vodě (DO/W). [1]

## **1.4 Univerzální mapa režimů toku**

V současnosti existuje mnoho studií, které se zabývají pozorováním nemísitelných kapalin v horizontálním potrubí. Avšak každá studie využívala pro svůj experiment odlišné jak kapaliny, tak i samotné potrubí. Výstupem těchto studií jsou takzvané mapy režimů toku. Velkou nevýhodou je jejich omezené využití pouze pro jeden specifický experiment. Proto byla vytvořena univerzální mapa režimů toku.

Tato mapa byla vytvořena za pomoci podobnostních čísel, díky kterým má všeobecné využití. Podobnostní čísla byla získána pomocí Buckinghamova čísla  $\Pi$  [5]. Pro stacionární izotermický tok existuje 11 proměnných, které režim ovlivňují: velikost rychlosti oleje a vody, hustota oleje a vody, viskozita oleje a vody, povrchová energie, průměr potrubí, drsnost potrubí, smáčivost a gravitační zrychlení. K těmto 11 proměnným přidáme ještě tři základní rozměry. Čas, hmotnost a délku. Pomocí Buckinghamova čísla získáme 8 bezrozměrných skupin, které popisují proudění nemísitelných kapalin v potrubí. [5,11]

---



---

## Studium proudění na rozhraní nemísitelných kapalin

---



---

1	Smáčivost	$\alpha$
2	Relativní drsnost	$\varepsilon/D$
3	Poměr hustot	$\rho = \rho_o/\rho_v$
4	Poměr viskozit	$\mu = \mu_o/\mu_v$
5	Objemový podíl vody	$C_v = \frac{U_v}{U_o + U_v}$
6	Reynoldsovo číslo směsi	$Re_s = \frac{\rho_s U_s D}{\mu_s}$
7	Eotvösovo číslo	$E_o = \frac{(\rho_v - \rho_o) g D^2}{\gamma}$
8	Froudeho číslo směsi	$Fr_s = \frac{U_s}{\sqrt{gD}}$

**Tab. 1:** Bezrozměrná kritéria pro proudění nemísitelných kapalin v potrubí [5,11,14]

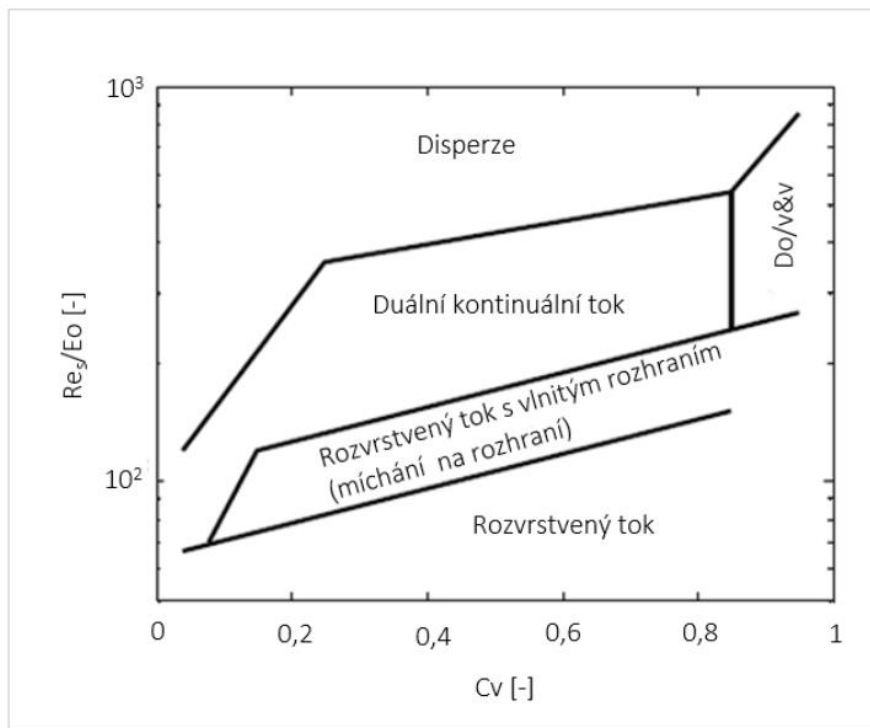
Kde hodnoty  $U_s$ ,  $\rho_s$  a  $\mu_s$  byly vypočítány z rovnic [11]:

$$U_s = U_o + U_v \quad (1)$$

$$\rho_s = C_v \rho_v + \rho_o (1 - C_v) \quad (2)$$

$$\mu_s = C_v \mu_v + \mu_o (1 - C_v) \quad (3)$$

Pomocí těchto bezrozměrných čísel dokážeme sestavit univerzální mapu režimů toku.



**Obr. 16:** Univerzální mapa režimů toku [11,14]

Mapa je závislá na objemovém podílu vody a poměru Reynoldsova čísla na Eotvösově číslu. Z tohoto poměru, kde Reynoldsovo číslo je poměr setrvačných sil k viskózním silám a Eotvösovo číslo je poměr gravitačních sil na povrchové energii, dokážeme odvodit, že pro laminární proudění, kdy dominují viskózní síly, dochází k rozvrstvenému toku. Poté při zvětšování Reynoldsova čísla začne disperze kapalin. [11]

## 2 Experimentální pozorování proudění

Jedním z cílů této diplomové práce je provedení experimentu pozorování proudění nemísitelných kapalin na sestavené trati. Experiment byl založen na srovnání výsledků s diplomovou prací Ing. Malé při rozdílném nátoku oleje do experimentální tratě. Proto bylo chování kapalin pozorováno ve vodorovné trubici, kdy jedna z kapalin natékala horizontálně a druhá vertikálně.

### 2.1 Volba kapalin

Při volbě kapalin musíme uvažovat nad jejich vlastnostmi, které jsou na sobě závislé. Kapaliny musí být spolu nemísitelné, ekologické, cenově dostupné a také musí mít kvalitní optické vlastnosti, abychom mohli pozorovat jejich vzájemné působení.

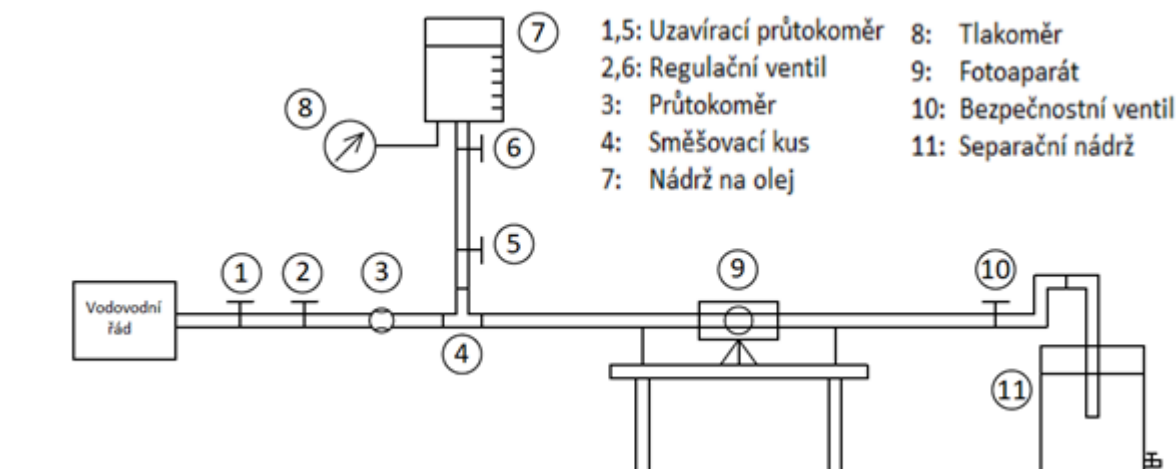
Z důvodů porovnávání výsledků z práce Malé [14] jsme vybrali stejné kapaliny se stejnými fyzikálními vlastnostmi. Vybrané kapaliny byly voda a olej z kukuřičných klíčků. Tato dvojice splňuje všechna kritéria, která jsme si zadali.

	Viskozita	Hustota	Povrchové napětí	Mezifázové napětí	Poměr viskozit	Poměr hustot
	[mPa.s]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[mN/m]	[mN/m]	[-]	[-]
olej z kukuřičných klíčků	52,92	861	31,11	41,64	52,81	0,86
voda	1,002[28]	998[23]	72,75[25]			

*Tab. 2: Fyzikální vlastnosti použitých kapalin [14,23,25,28]*

### 2.2 Experimentální trať

Naše experimentální trať (trať 1) byla postavena tak, abychom dosáhli požadovaných cílů. Úkolem této diplomové práce bylo také srovnat výsledné hodnoty s prací Ing. Malé [14]. Trať se lišila nátokem oleje, kde trať 1 přiváděla olej shora ve srovnání s tratí Malé (trať 2), která přiváděla olej zespodu. Následující obrázek ukazuje experimentální uspořádání naší tratě.



**Obr. 17:** Schéma měřicí tratě 1

Trať 1 se skládá z potrubí, které přivádí vodu. Voda byla v případě klasického pozorování přiváděná přímo z vodovodního řádu. Pro PIV experiment jsme museli do vody přidat částice, proto byla nejdříve napuštěna do nádrže, obohacena o částice a až poté jsme ji přivedli do měřicí tratě. Prítok vody jsme regulovali pomocí regulačního ventilu.

Pro olej byla vytvořena nádrž, do které jsme kapalinu napustili a následně olej pomocí regulačního ventilu vpouštěli do systému. Obě potrubí jsme svedli t-kusu. Tento t-kus byl speciálně vyroben tak, aby přechod mezi přiváděcími potrubími byl co nejplynulejší. Tímto jsme se pokusili zabránit vzniku rušivých jevů, které by mohly negativně ovlivnit tok kapaliny. Na t-kus navazovalo 2 metry dlouhé potrubí, kde docházelo k námi pozorovanému jevu. Nakonec směs odtékala do separační nádrže. V této nádrži došlo k separování vody a oleje a následnému odlití vody a přelití oleje zpět do olejové nádrže, kde jsme jej mohli znovu využít.

Průtoky vody jsme měřili pomocí indukčního průtokoměru. Průtok oleje byl určován pomocí změny tlaku v nádrži. Pomocí této změny jsme byli schopni dopočítat změnu hladiny oleje a následně z ní zjistit rychlost vytékajícího oleje. U potrubí jsme potřebovali zajistit jeho průhlednost. Toho jsme dosáhli výrobou potrubí o vnitřním průměru 19 mm z plexiskla.

Celý experiment byl postaven tak, aby kapaliny měly konstantní teplotu 22 °C. Při PIV pozorování byla venkovní teplota nižší, a proto jsme museli jak vodu, tak olej ohřívat v nádržích. Proto můžeme brát hustotu a viskozitu jako konstanty a proměnnými jsou pouze rychlosti obou kapalin. Záznam signálu tlakoměru a průtokoměru byl proveden pomocí LabVIEW. Z tohoto programu jsme následně získávali data pro pozdější zpracování.

Pro měřicí přístroje jsme použili diferenční snímač tlaku Camille Bauer Newport DP 705 s rozsahem 60 kPa s přesností 0,25 %. Pro měření průtoku byl využit průtokoměr Swissflow SF8000. Ten měří s rozsahem 0,5 - 20 litrů za minutu a přesností 1 % [26].





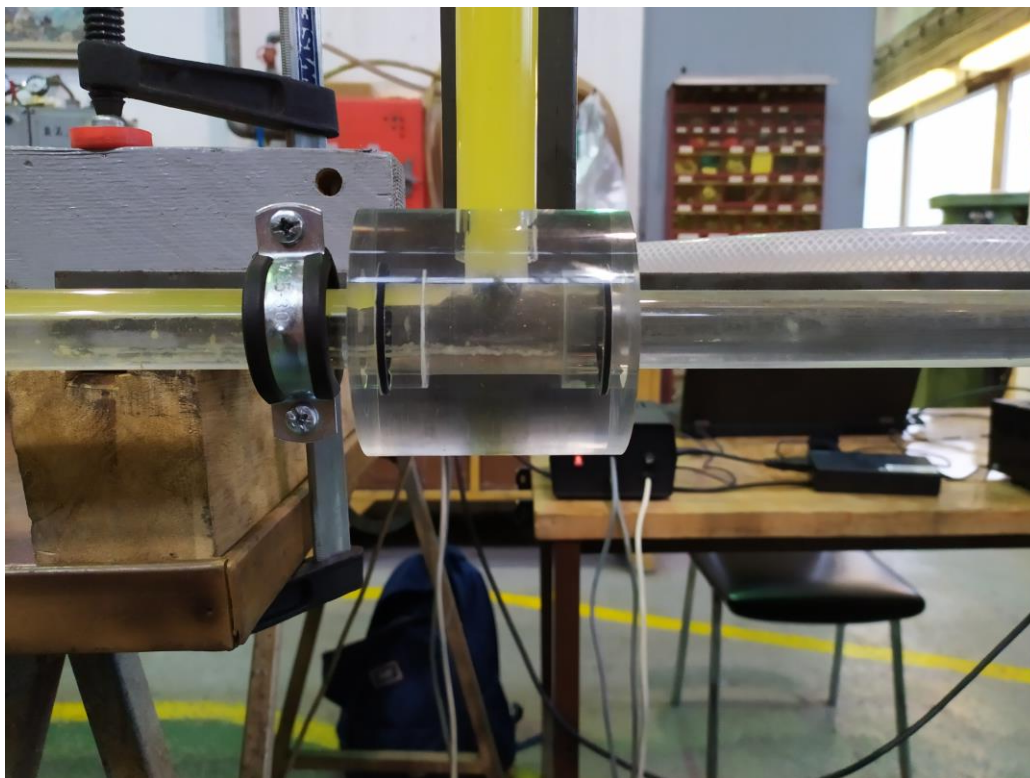
*Obr. 18: Přívod kapalin*



*Obr. 19: Separační nádrž*



*Obr. 20: Vyrobený T-kus*



*Obr. 21: T-kus v provozu*



*Obr. 22: Diferenční tlakoměr Camille Bauer Newport DP 705*

## 2.3 Výsledky experimentu

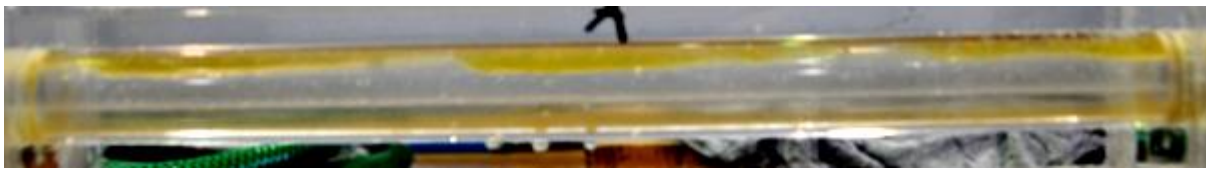
Jak už bylo výše uvedeno, jedním z cílů této diplomové práce bylo experimentálně pozorovat jednotlivé typy režimů proudění pro nemísitelné kapaliny. Při experimentu jsme měnili vstupní hodnoty rychlostí oleje a vody čímž jsme dosáhli několika režimů toku.

### Rozvrstvený tok s hladkým rozhraním



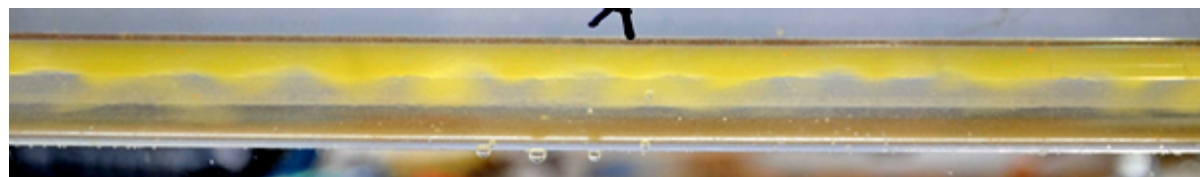
*Obr. 23: Rozvrstvený tok s hladkým rozhraním*

### Rozvrstvený tok s vlnitým rozhraním



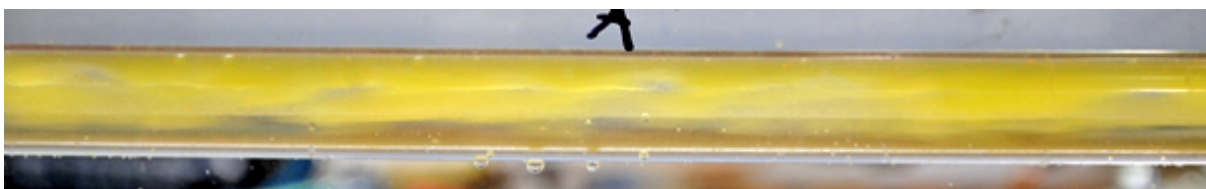
*Obr. 24: Rozvrstvený tok s vlnitým rozhraním*

### Třívrstvý tok



*Obr. 25: Třívrstvý tok*

### Disperzní tok



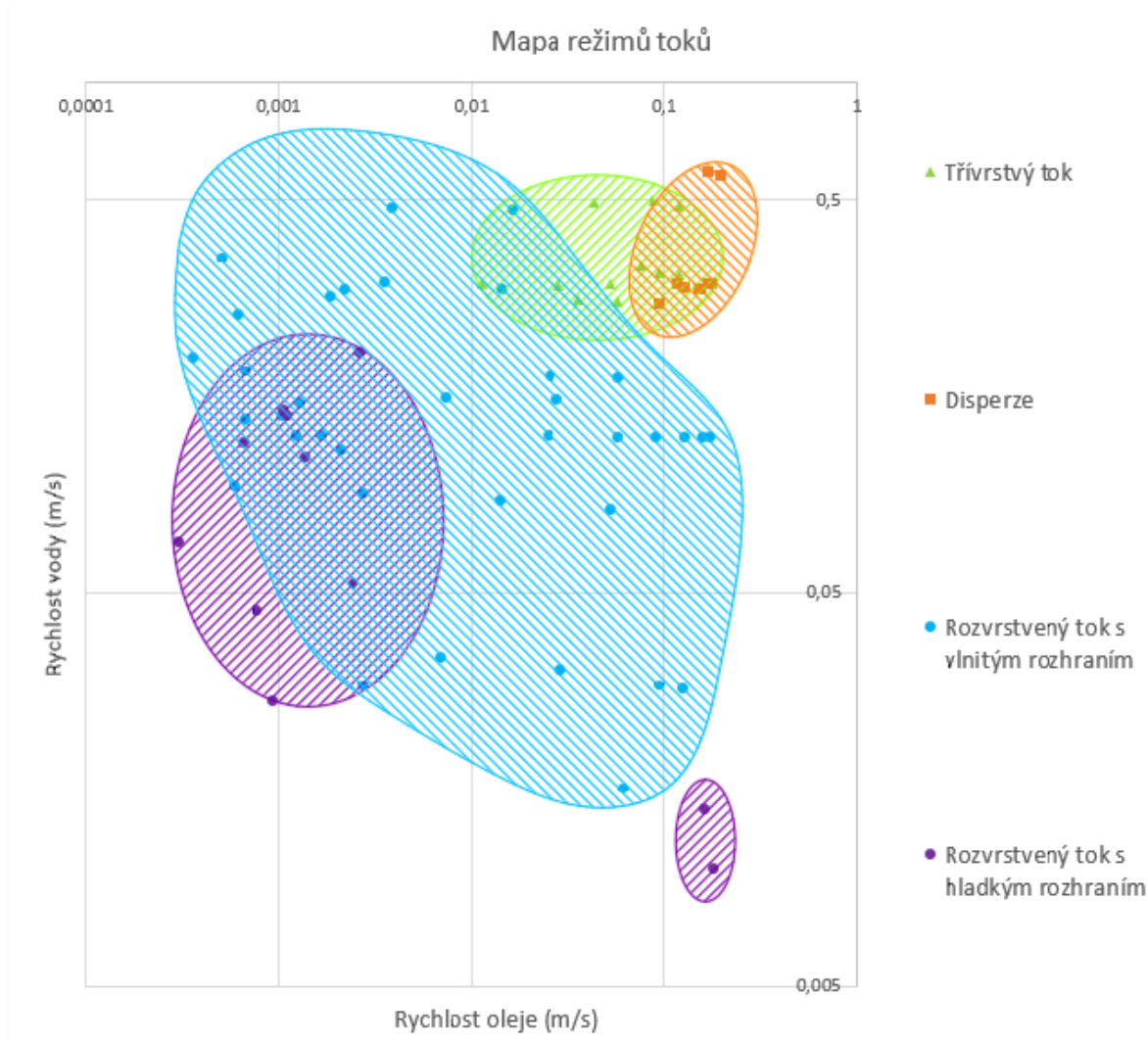
*Obr. 26: Disperzní tok*

Zjištěné režimy se pohybují od rozvrstvených až po disperzi toku. Pozorovali jsme 4 typy tokových režimů. Přesněji rozvrstvený tok s hladkým rozhraním, rozvrstvený tok s vlnitým rozhraním, třívrstvý tok a dispergovaný tok. Přechod mezi těmito režimy je plynulý, a proto nelze přesně říct, kdy dojde k přechodu jednoho režimu na druhý. Díky tomu může docházet k překrytí jednotlivých režimů. Při měření se nám nepodařilo zajistit vznik přerušovaného a prstencového toku. Za důsledek nepřítomnosti prstencového toku můžeme považovat nedostatečné rychlosti kapalin a také nízkou viskozitu oleje.

Nepřítomnost přerušovaného režimu je způsobena typem přítoku oleje do potrubí s vodou. Olej má nižší hustotu, což způsobuje zastavení oleje rovnou na horní části potrubí. Díky tomu nedochází k jejich promíchání a následnému vzniku olejových bublin ve vodě.

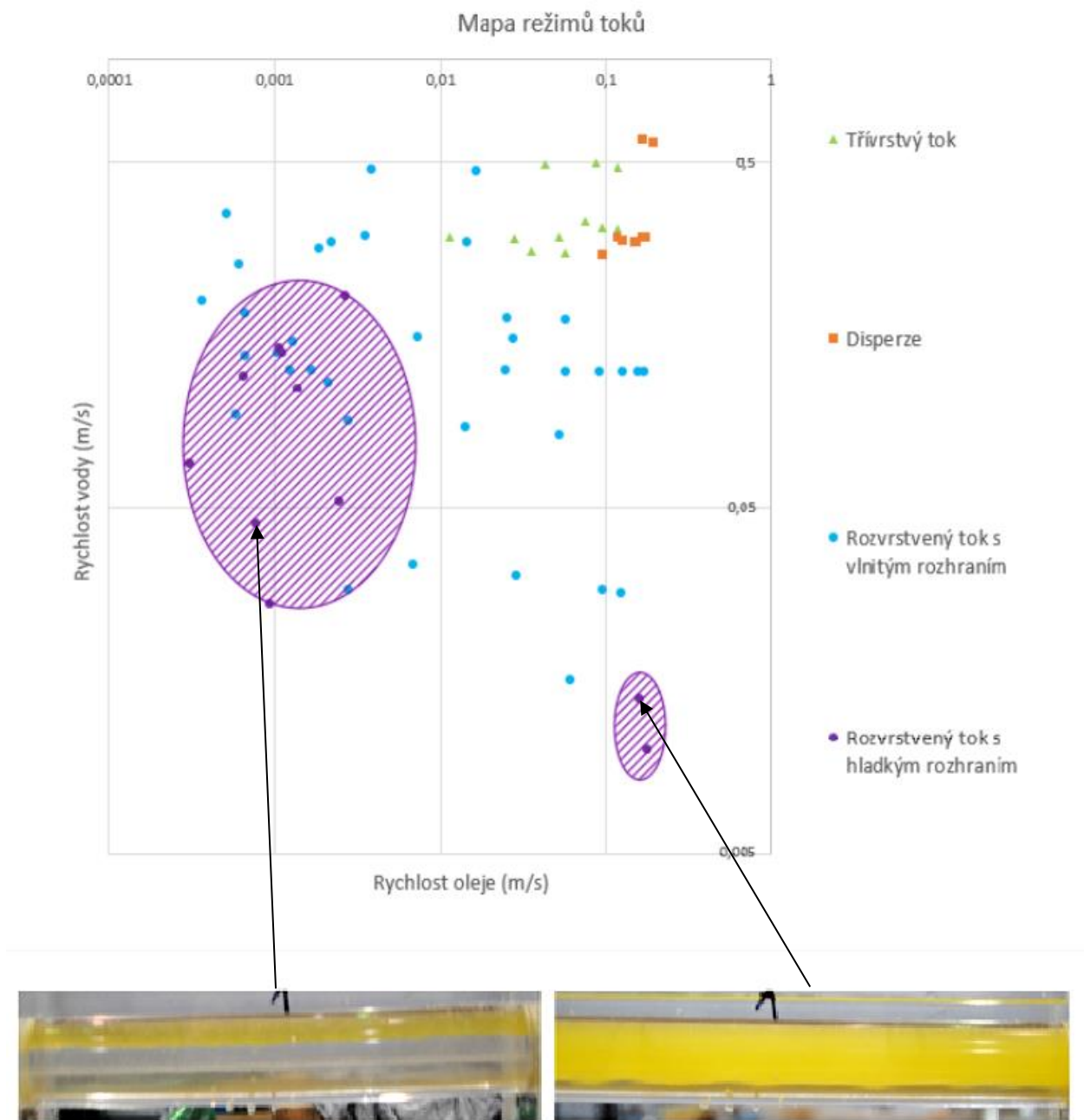
U každého měření bylo vytvořeno několik fotografií, pomocí kterých jsme následně vyhodnocovali jednotlivé proudění. Nakonec bylo provedeno 69 měření. Z těchto měření byly vytvořeny grafy, které zobrazují jejich vzájemné závislosti.





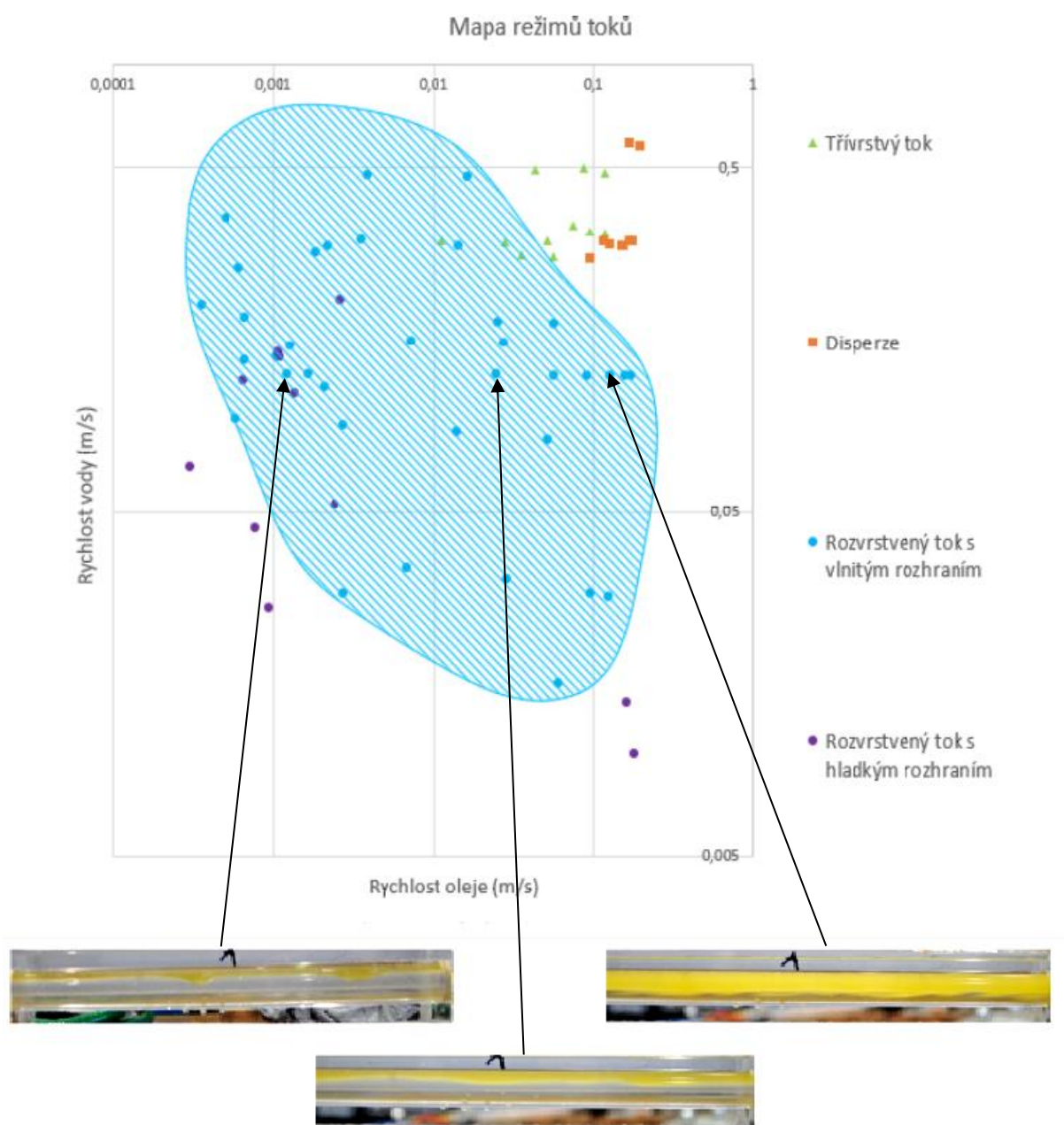
**Obr. 27:** Závislosti režimu toku na vstupních rychlostech oleje a vody

Z grafu vstupních rychlostí dokážeme pozorovat určitý systém ve vzniku režimů toku. Pro malé rychlosti vody a oleje vidíme vznik rozvrstveného toku. Rozvrstvený tok s hladkým rozhraním vzniká při nízkých rychlostech, kdy hlavním faktorem, který ovlivňuje proudění, je gravitace. Při zvyšování rychlostí začne hrát významnou roli turbulence. Zvyšováním vstupní rychlosti začne docházet ke vzniku vln na rozhraní. Velikost a frekvence výskytu vln se zvětšuje až dojde k dosažení mezní velikosti, kdy se začnou z olejové fáze odtrhávat kapky oleje. Tento typ proudění nazýváme třívrstvý tok. Dalším stupněm po třívrstvém proudění je už samotná disperze, a to jak disperze oleje ve vodní fázi, tak disperze vody v olejové fázi. Disperze nastává při dalším zvyšování vstupních rychlostí.



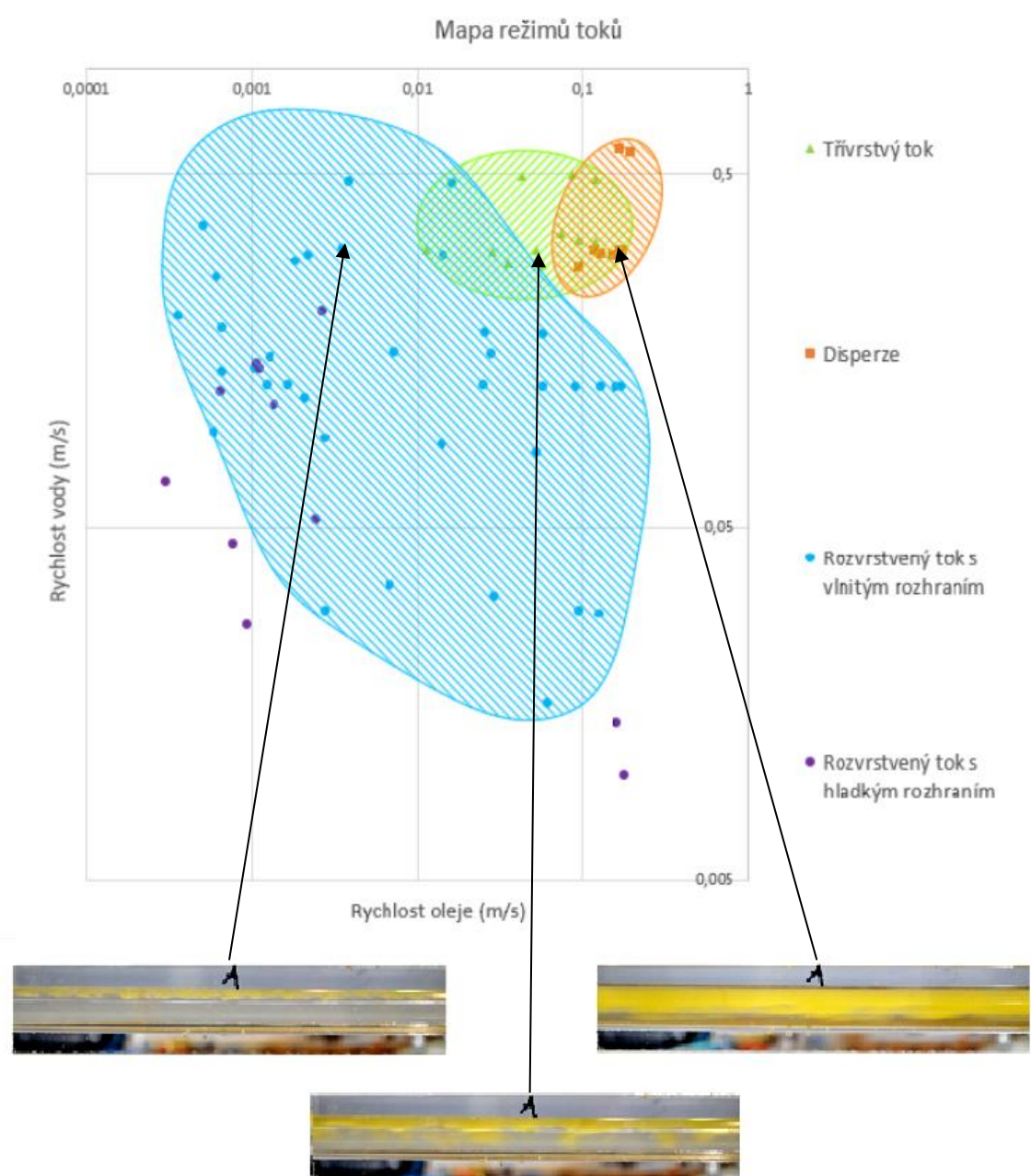
**Obr. 28:** Rozdíl mezi umístěním rozvrstveného toku s hladkým rozhraním

Na obrázku vidíme dvě oblasti, kde se vyskytuje rozvrstvený tok s hladkým rozhraním. Rozdíl mezi těmito oblastmi je v tom, že v oblasti více nalevo je vyšší rychlost vody, a tedy i vyšší objemový podíl vody. Druhá oblast obsahuje výrazně více oleje než vody.



**Obr. 29:** Porovnání rozvrstveného toku s vlnitým rozhraním pro různé vstupní rychlosti oleje

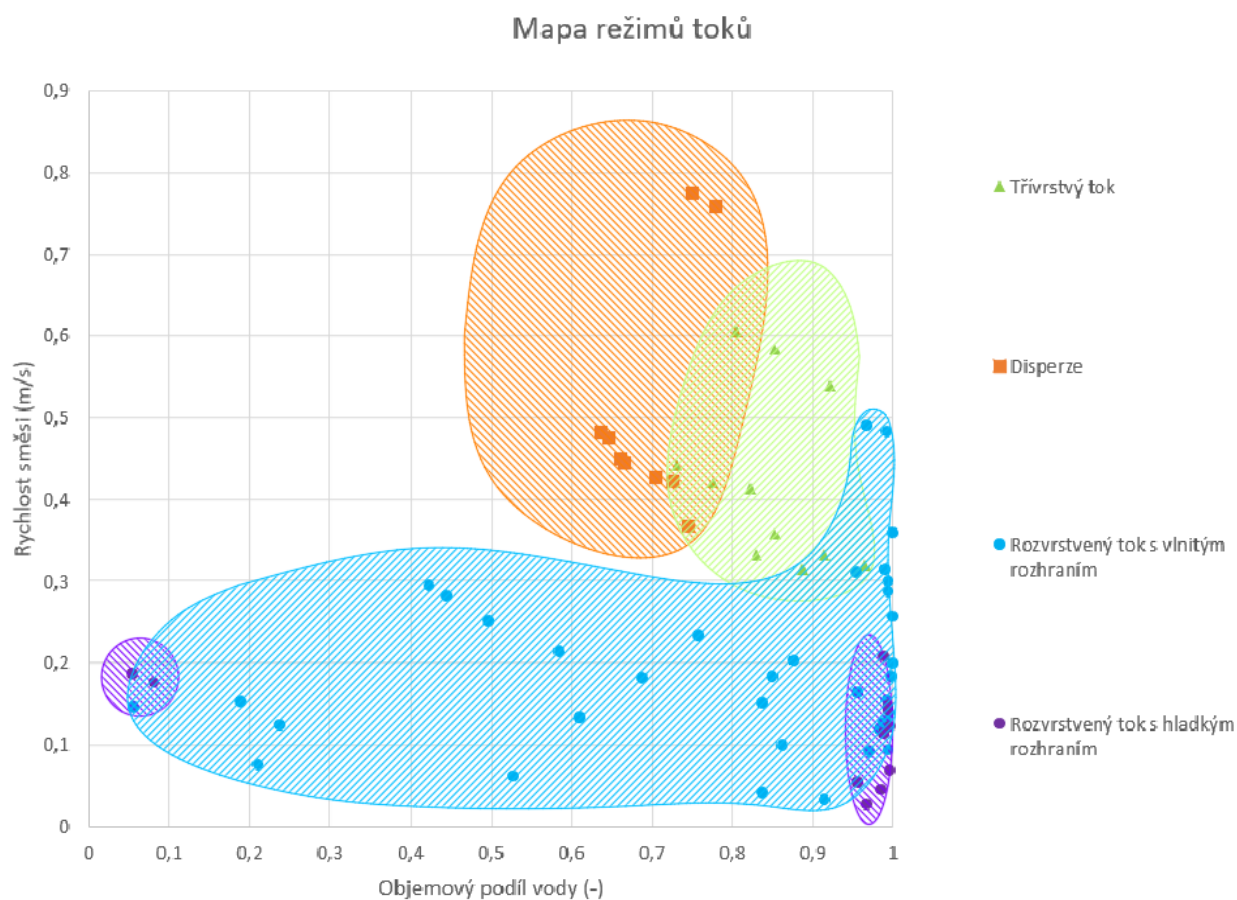
Na výše uvedeném obrázku můžeme pozorovat zvětšování frekvence a amplitud vln. Na levém obrázku je patrné, že tok je rozvrstven s téměř hladkým rozhraním, kdy k vlnám dochází při utrnutí větší části oleje v t-kusu. Prostřední obrázek zobrazuje dobře viditelné vlny a na obrázku vpravo jsou již rychlosti oleje tak velké, že vzniká i několik vln zaráz.



**Obr. 30:** Přechod z rozvrstveného toku na disperzní tok

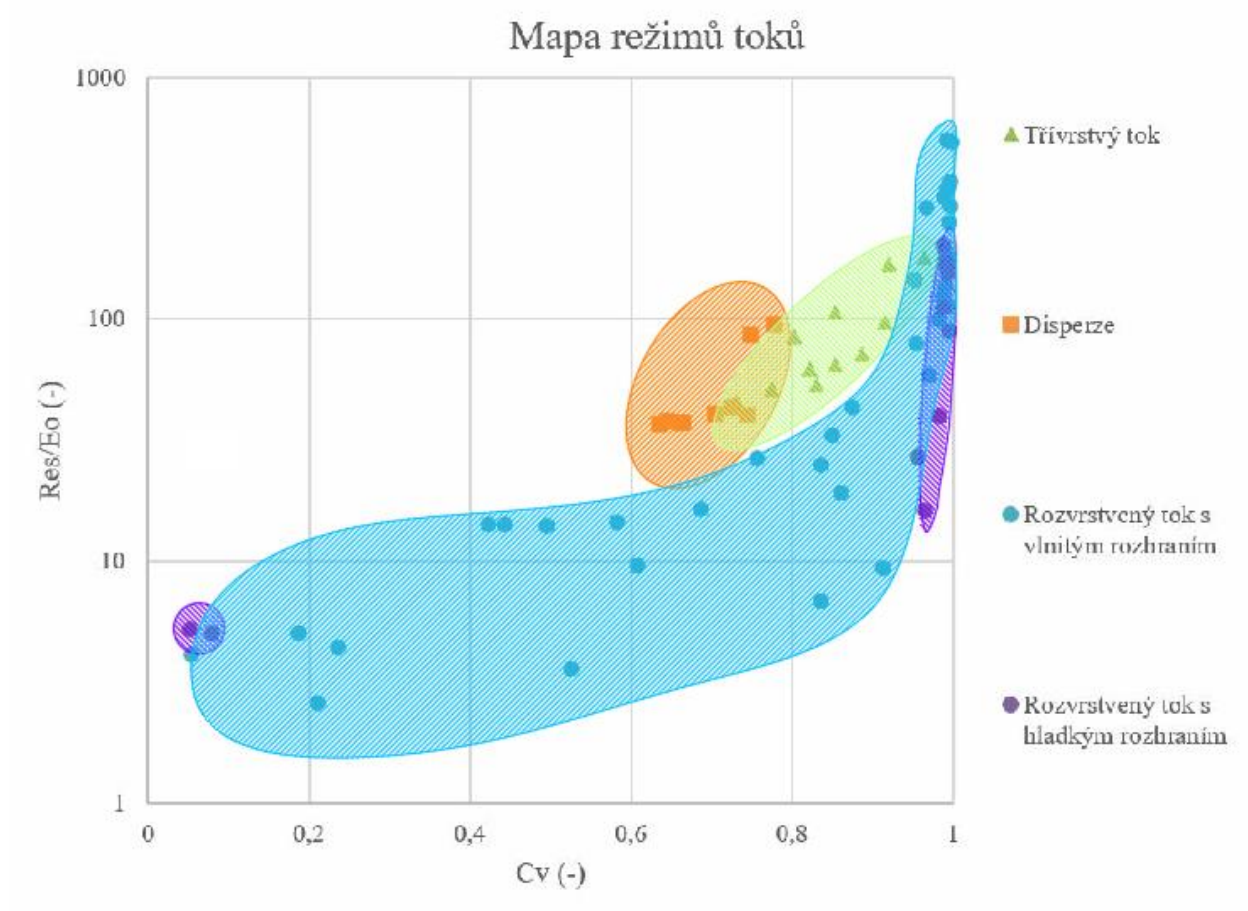
Obrázek zobrazující přechod rozvrstveného toku na disperzní tok pozorujeme postupný přechod jednotlivých proudění. Ten probíhá tak, že se nám při zvyšování průtoku z rozvrstveného proudění začnou oddělovat kapky oleje, čímž dosáhneme třívrstvého toku. Pokud budeme pokračovat ve zvyšování průtoku, oddělí se tolik oleje, že nám začne dispergovat





**Obr. 31:** Závislosti režimu toku na objemovém podílu vody a směsi

Dále jsme vytvořili další typ grafu, ve kterém jsme porovnávali objemový podíl vody s rychlostí směsi. Z grafu lze pozorovat několik velmi zajímavých hodnot. Z měření nám vychází, že pro rychlosti směsi menší než 0,3 m/s se vyskytuje pouze rozvrstvený tok. Výskyt disperzního a třívrstvého toku je pouze, pokud směs obsahuje více jak 3% oleje. Z důvodů limitace naší experimentální trati jsme nebyli schopni naměřit toky vyšších rychlostí s větším obsahem oleje.

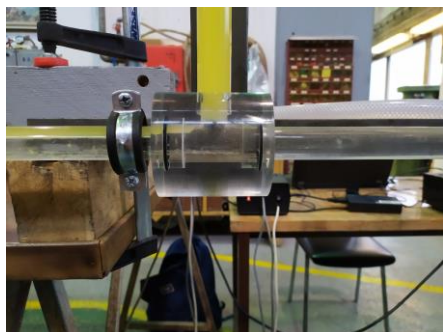


**Obr. 32:** Bezrozměrná mapa režimů toku

Jako poslední jsme vytvořili bezrozměrnou mapu režimů toku. Tato mapa porovnává objemový podíl vody s podílem Reynoldsova a Eotvosova čísla. Pomocí této mapy dokážeme srovnat výsledky s jinými experimenty

## 2.4 Porovnání přítoků oleje do experimentální trati

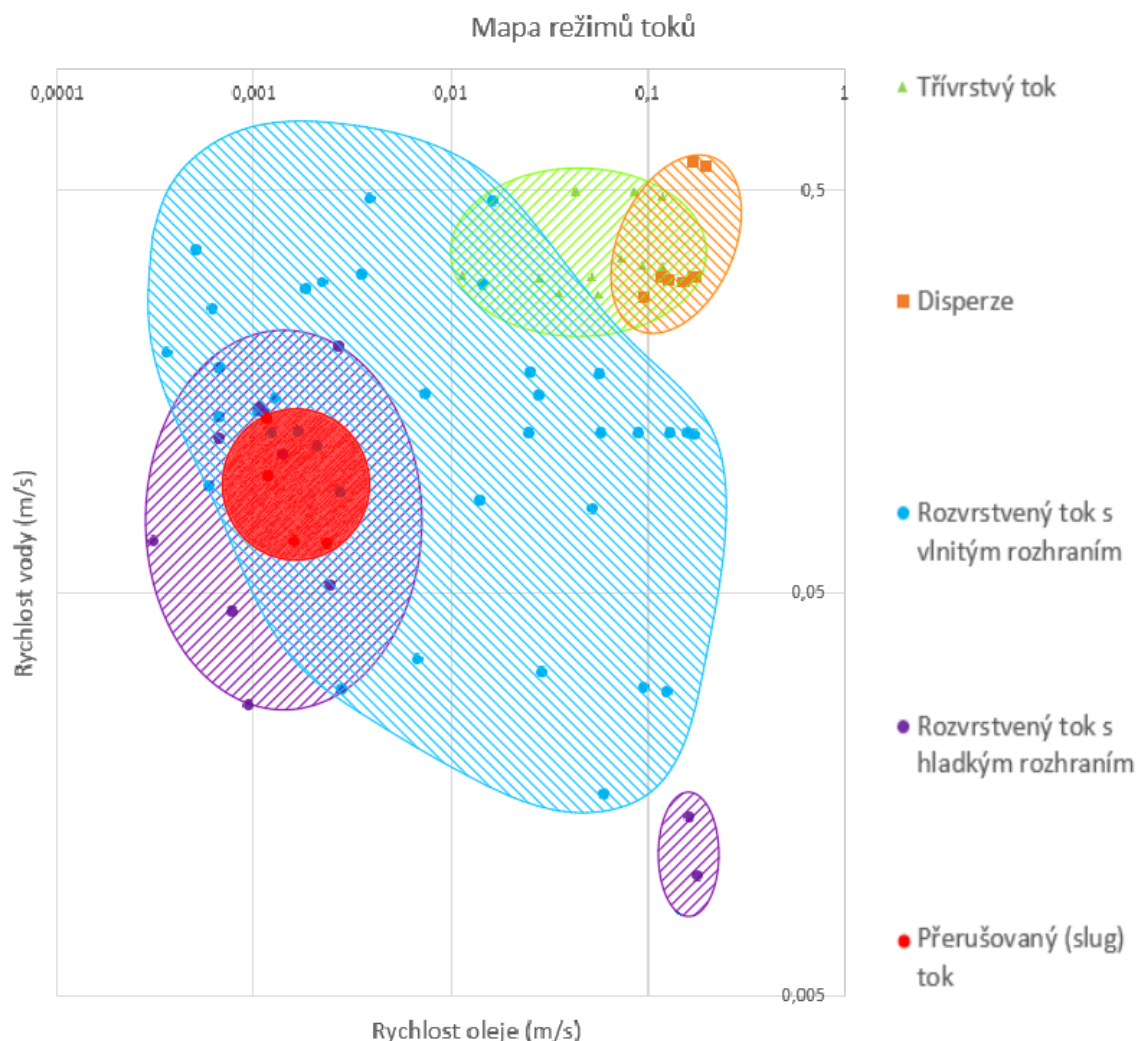
Experiment navazuje na práci Ing. Malé [14], u něhož jsme změnilí směr přítoku oleje do trati. V této diplomové práci olej natékal shora a na trati 2 [14] natékal zespodu. Dalším, již méně významným rozdílem, byl typ použitého T-kusu. Trať 1 používala speciálně vyrobený t-kus, který se pokoušel minimalizovat vzruchy, a trať 2 využila t-kus klasicky průmyslově používaný [14].



**Obr. 33:** *T-kus použitý na trati 1 (vlevo), T-kus použitý na trati 2 (vpravo) [14]*

Hlavním rozdílem vyplývajícím ze směru připojení oleje je výskyt přerušovaného toku. Pro připojení shora se pro námi měřené hodnoty tohoto jevu dosáhnout nepodařilo. Naopak při připojení ze spodu se tento typ proudění vytvořil. Pro potvrzení tohoto rozdílu jsme u námi postavené experimentální trati přetočili přítok oleje, a pak se nám přerušovaného toku podařilo dosáhnout.

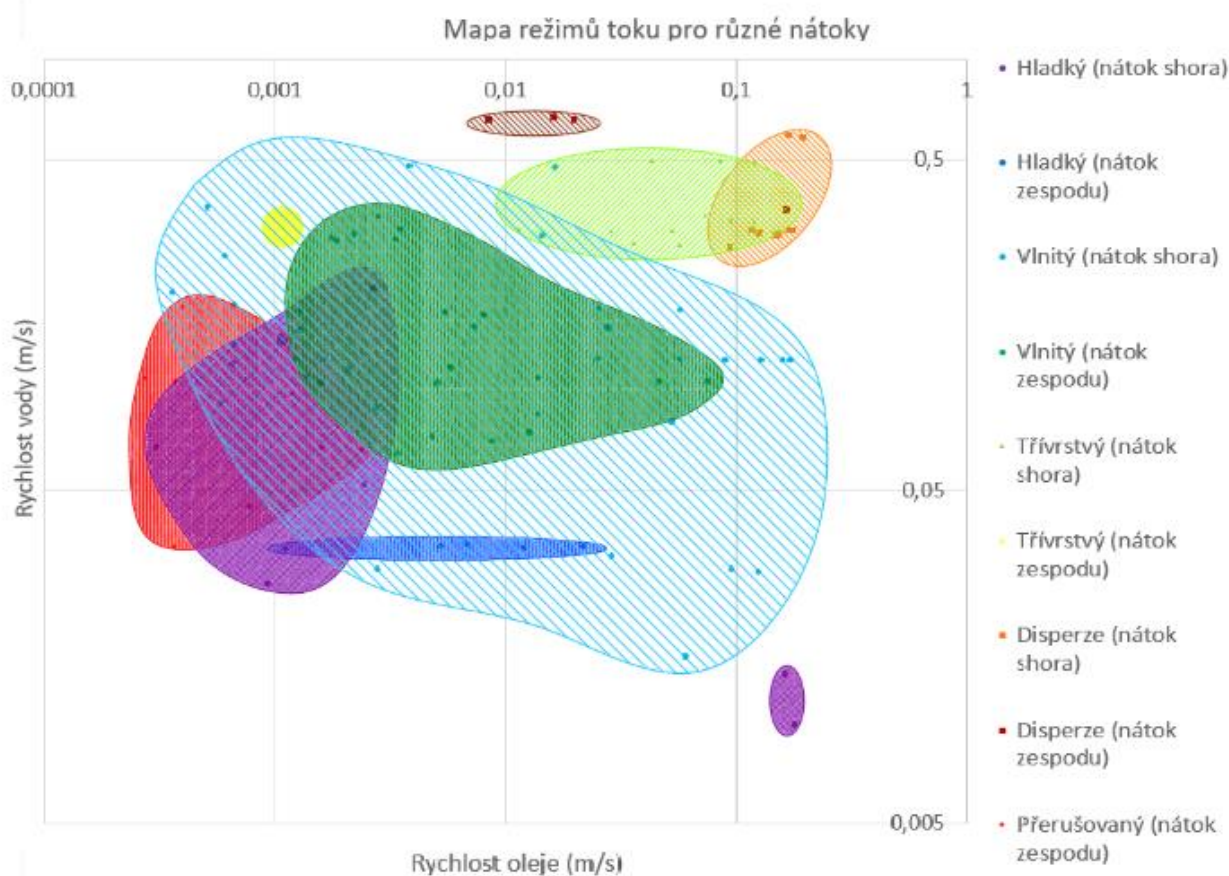
Tento rozdíl je pravděpodobně způsoben tím, že při přítoku zespodu musí olej, který má nižší hustotu, přejít přes vrstvu vody a dostat se do horní části potrubí. Při tomto přechodu tak může vznikat přerušovaný tok. Při přítoku shora k tomuto přechodu nedochází a díky tomu nemůže probíhat ani přerušovaný mód.



**Obr. 34:** Bezrozměrná mapa režimů toku s oblastí obráceného nátoku oleje

Na obr. 35 je červeně označená oblast, ve které jsme našli přerušovaný tok při otočeném nátoku zespodu. Z toho poznatku vychází, že nátok kapaliny výrazně mění celou mapu režimů toku. A to tak, že při nátoku shora dochází k rozvrstvenému toku a při nátoku zespodu vzniká přerušovaný režim. Dalším významným rozdílem je výskyt třívrstvého toku při přechodu z přerušovaného na disperzní. Tato oblast třívrstvého toku při nátoku shora chybí.





Obr.35: Mapa režimů toku s nátoky shora a zespodu [14- upraveno]

Rozdíly mezi výskytem rozvrstveného toku s hladkým a vlnitým rozhraním můžeme z části zdůvodnit subjektivním hodnocením. Tato odchylka je způsobena vizuálním hodnocením jednotlivých toků a jejich plynulého přechodu. Jelikož neexistuje pevná hranice mezi jednotlivými toky, tak tyto přechody mohou být v každé práci uvažovány jinak. Při pozorování nátoky oleje zespodu došlo k méně měřením, proto jsou oblasti jednotlivých režimů menší. Dále se na obrázku vyskytují oblasti při rychlostech, kdy zde byl proveden pouze jeden typ měření a nelze tak tyto oblasti srovnat.

Avšak i přes toto hodnocení dochází při různých nátocích k výrazným rozdílům. Jak již bylo dříve zmíněno, tak při nátoky shora se neobjevuje přerušovaný tok. Dále můžeme se vyskytnout významná odchylka při výskytu režimu toku s hladkým rozhraním. Při nátoky zespodu (tmavě modrá) se oblast překrývá s režimem toku s vlnitým rozhraním (světle modrá). U nátoky shora dochází k toku s hladkým rozhraním (fialová) při extrémních hodnotách, kdy jedna z fází je velmi pomalá. U třívrstvého toku, taktéž dochází k výraznému posunu oblastí výskytu, kdy při nátoky zespodu (žlutá) se oblast nachází ve rozvrstveném toku (světle modrá). Z obrázku lze usoudit, že při nátoky shora oblast rozvrstveného toku se zvlněným rozhraním (světle modrá) zabírá mnohem větší úseky rychlostí oleje a vody.

### 3 Particle image velocimetry (PIV)

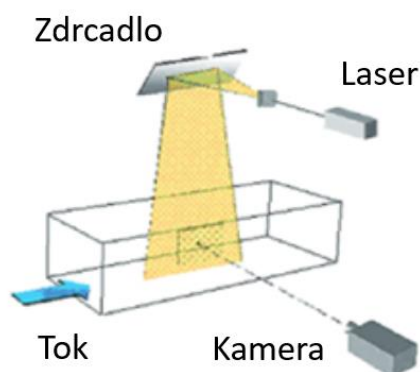
Zjištění rychlosti v tekutině je velmi náročné z důvodu, že uvnitř plynů a většiny kapalin nejsou vidět pohybující se částice, díky kterým bychom mohli odhalit jejich změnu polohy. Proto byly vyvinuty techniky, díky kterým dokážeme změřit rychlost toku nepřímo. Mezi tyto techniky můžeme zařadit tlakové sondy, anemometry nebo přenos tepla pomocí teplého drátu. Tyto techniky nejsou tak náročné na použití, nezanáší médium a jsou levnější ve srovnání s jinými technikami. Jejich hlavní nevýhodou je, že tento typ měření zasahuje přímo do toku média. [27]

Pro měření, u kterých nechceme změnit vlastnosti proudění, využíváme takzvaných optických metod. Tento typ měření je založen na tom, že měřicí senzory jsou mimo proudění a zachycují ho zvenčí. V nich se využívá takzvaných tracer particles. To jsou částice, které následují proudění bez toho, aby ho nějak ovlivnili. Mezi nejpoužívanější metody patří Laser Doppler Velocimetry (LDV), Laser Two Focus (L2F) a Particle Image Velocimetry (PIV).

Metoda LDV je založena na Dopplerově jevu, kdy laserový paprsek změří velikost rychlosti kapaliny pomocí posuvu frekvence odraženého laseru. L2F počítá za jakou dobu částice zvládnou projít mezi dvěma lasery. Metoda PIV je založena na pozorování souboru částic a jejich posuvu za určitý časový okamžik. Měření využívá odrazu světla od těchto částic. [16]

#### 3.1 Princip PIV

Princip PIV vychází z pozorování přesunu částic uvnitř proudu kapaliny nebo plynu za určitý časový interval. Ve většině případů musíme do tekutiny tyto částice přidat. Podmínkou je, aby přidané částice byly dostatečně malé a lehké tak, aby nedocházelo k ovlivnění proudění. Na tok svítíme laserem tak, abychom v kapalině vytvořili nasvícenou rovinu. Paprsky světla se pak odrazí od částic a doputují do kamery, která celou dobu oblast snímá vysokorychlostní kamerou. Ta zachytí změnu polohy částic. K vyhodnocení použijeme software, který zjistí vektory velikostí pro pozorovanou oblast. [16]



Obr. 36: 2C-PIV [4]

## 3.2 Částice

Do měřené tekutiny je nutné ve většině případů přidat částice, které nám umožní je dobře pozorovat. Vybíráme je hlavně podle dvou hledisek. Prvním z nich je jejich schopnost pohybovat se stejně jako sledovaná kapalina. To znamená, že částice se nebudou pohybovat v rozporu s kapalinou. Druhým hlediskem jsou jejich optické vlastnosti. Samozřejmě musíme zahrnout i cenu samotných částic, která není zanedbatelná. [16]

### Mechanické vlastnosti kapaliny

První a hlavní otázkou, na kterou narazíme při výběru částic, je to, zda se, pokud je to možné, hustota tekutiny a přidaných částic shodují. Pokud by hustoty nebyly podobné, tak by docházelo buď k vystoupaní nebo sedimentaci částic. Co se týká kapalin, není problém nalézt částice s podobnou hustotou. Ten ale vyvstává při pozorování plynů, kde se buď používají mýdlové bubliny naplněné heliem nebo částice velmi malých rozměrů. Pro výběr správných částic existuje takzvané Stokesovo číslo

$$Stk = \frac{\tau_p}{\tau_f} \quad (4)$$

kde  $\tau_p$  je reakční čas částice a  $\tau_f$  je charakteristické časové měřítko. Pro velikosti Stokesova čísla menší než  $10^{-1}$  jsou částice dostatečné. [16]

### Světelné vlastnosti částic

Pro PIV je odražené světlo jednou z nejdůležitějších vlastností přidaných částic. Čím více světla odrazíme, tím kvalitnější bude celé měření. Samotné odražené světlo můžeme ovlivnit buď zvýšením výkonu laseru nebo správným výběrem částic. Většinou je více efektivní a ekonomické upravit samotné částice než pořizovat nový laser. Rozptýlené světlo je závislé na velikosti, tvaru, orientaci, polarizaci a poměru indexu lomu částic a okolního média. Pro kulové částice, které mají průměr větší, než je vlnová délka použitého laseru, můžeme využít Mieho teorii rozptylu. [8] Z této teorie dokážeme zjistit rozptyl průřezu  $C_s$ .

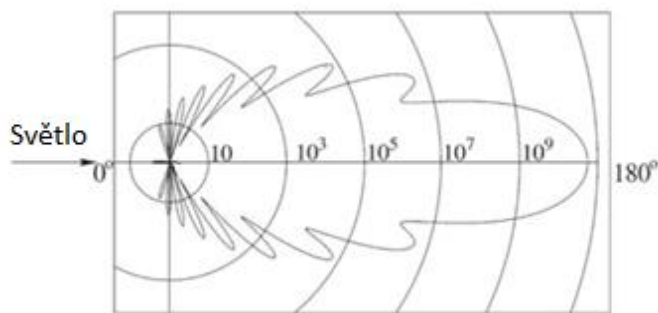
$$C_s = \frac{P_s}{I_0} \quad (5)$$

kde  $P_s$  je celková rozptýlená energie a  $I_0$  je intenzita laseru. [16]

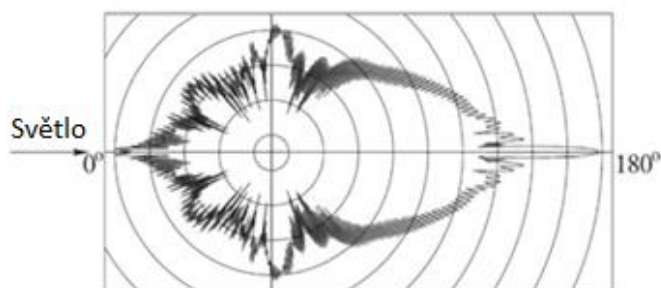
Průměr částic $d_p$ ( $\mu\text{m}$ )	Rozptyl průřezu $C_s$ ( $\text{m}^2$ )
1.0	$\approx 10^{-12}$
0.5	$\approx 10^{-12}$
0.2	$\approx 10^{-13}$
0.125	$\approx 10^{-14}$

**Tab. 3:** Přibližné hodnoty rozptylu průřezu pro různé průměry olejových částic ve vzduchu [16]

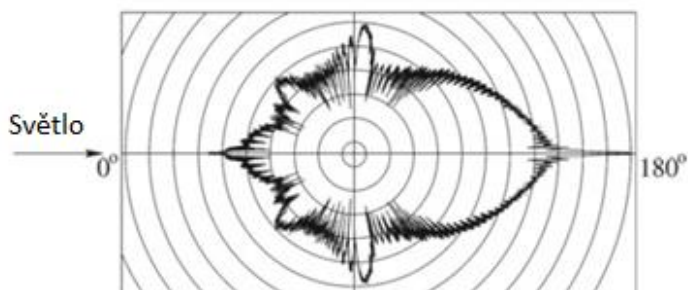
V tabulce č. 1 vidíme, že pro různé velikosti částice se rozptyl výrazně mění. U každé částice je důležité, z jakého úhlu se na proudění díváme. Pro stereoskopické PIV můžeme mít kamery postaveny tak, aby došlo k maximalizaci vyzařovaného světla. Avšak pro klasické PIV musí být kamery postavena v  $90^\circ$ , aby nedošlo ke změně perspektivy. Z obrázků 2, 3 a 4 vidíme, že pro zvětšující se průměry částic dochází k většímu rozptylu světla. [16]



**Obr. 37:** Rozptyl světla pro  $1 \mu\text{m}$  skleněnou částici ve vodě [16]



**Obr. 38:** Rozptyl světla pro  $10 \mu\text{m}$  skleněnou částici ve vodě [16]



**Obr. 39:** Rozptyl světla pro  $30 \mu\text{m}$  skleněnou částici ve vodě [16]



### Volba částic pro kapaliny a plyny

Pro každý typ tekutiny existuje několik druhů částic, které můžeme použít.

Typ	Materiál	Průměr v $\mu\text{m}$
Pevná látka	Polystyren	10-100
	Hliníkové vločky	2-7
	Duté skleněné kuličky	10-100
	Granule se syntetickým povlakem	10-500
Kapalina	Různé oleje	50-500
Plyn	Vzduchové bubliny	50-1000

**Tab. 4:** Typ částic pro proudění v kapalině [16]

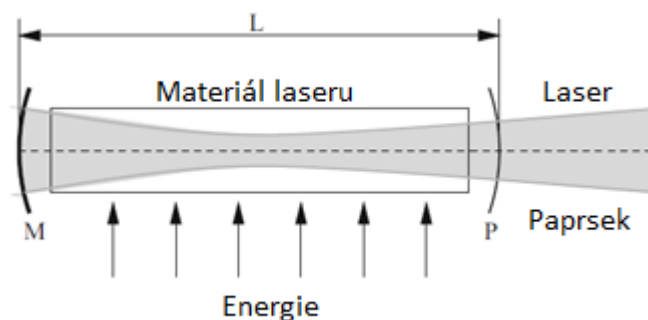
Typ	Materiál	Průměr v $\mu\text{m}$
Pevná látka	Polystyren	0.5-10
	$\text{Al}_2\text{O}_3$	0.2-5
	$\text{TiO}_2$	0.1-5
	Skleněné mikro-kuličky	0.2-3
	Skleněné mikro-balónky	30-100
	Granule se syntetickým povlakem	10-50
	Bis(2-ethylhexyl)-ftalát	1-10
	Kouř	<1
Kapaliny	Různé oleje	0.5-3
	Různé propylene glykoly	0.5-1.5
	Směs glycerinu s vodou	0.5-2
	DEHS	0.5-1.5
	Bubliny plněné heliem	200-3000

**Tab. 5:** Typ částic pro proudění v plynu [16]

Když vybereme částice, které jsou výrazně menší než použitá vlnová délka laseru, musíme použít Rayleighovu teorii rozptylu. Pro tyto částice je velmi těžké zachytit kvalitní obraz, proto se využívají částice, které jsou natřeny fluorescenční barvou. [16]

### 3.3 Světelné zdroje

Ve většině případů používáme za světelný zdroj lasery, avšak při speciálním měření může být použita LED dioda nebo zdroj bílého světla. Existuje mnoho druhů a kombinací laserů, proto zde uvedu ty nejčastěji používané pro sledování PIV měření. Lasery se mohou lišit použitým typem média, pumpou a natočením zrcadel. [16]



Obr. 40: Schématický diagram laseru [16]

### Argonový laser ( $\text{Ar}^+$ laser)

Základem Argonového laseru je plynové médium. To se nejčastěji používá při vlnové délce 514,5 nm. Mnoho laboratoří tento typ laseru zná a používá ho hojně pro LDV měření. V případě PIV měření pomalu tekoucího proudění je tento laser také vhodný. Jeho velkou nevýhodou ale je, že potřebuje velmi vysoký proud a jeho účinnost je v desetinách procenta. [16]

### Neodym-YAG laser (Nd:YAG laser)

Nd:YAG laser je nejdůležitějším pevnolátkovým laserem. Paprsek je tvořen ionty  $\text{Nd}^{3+}$ , které jsou většinou použity s YAG krystaly (yttrium-hliník-granát). Nd:YAG laser se skládá ze čtyřprvkového systému, u kterého je výhoda, že vyzařuje světlo již při menších výkonech. Při klasickém používání Nd:YAG dochází k vyvolání paprsku o vlnové délce 1064 nm. Pro většinu PIV se používá speciální krystal, který mění vlnovou délku na 532 nm.

Hlavní nevýhodou tohoto laseru je fakt, že kvůli tepelnému zatížení čočky dochází k výraznému zhoršení kvality paprsku. Díky tomu je možné používat laser jen na několik málo centimetrů.

Komerčně dostupné Nd:YAG lasery mají krystal dlouhý 150 mm s průměrem do 10 mm. Obvyklá energie jednoho pulsu se pohybuje kolem 400 mJ. Dost často se využívá dvou-laserového systému z důvodu nekvality paprsku. [16]

### Neodym-YLF laser (Nd:YLF laser)

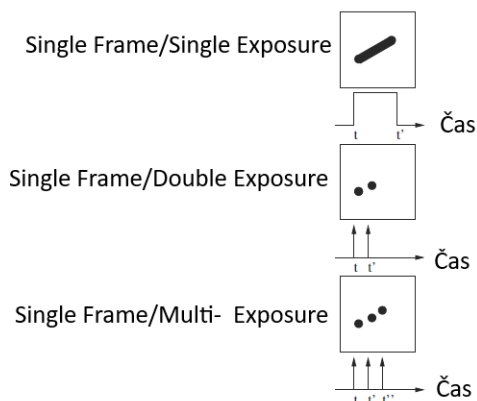
Nd:YLF laser je velmi často používán pro vysokorychlostní měření až do 10 kHz. U tohoto laseru se využívá krystalu YLF (yttrium-lithium-fluorid). Základní vlnová délka tohoto laseru je 1053 nm, která je dále přeměněná na viditelné světlo o velikosti 526 nm. Nd:YLF má stejné nevýhody jako Nd:YAG a z velké části jsou si tyto lasery dosti podobné. [16]

### LED

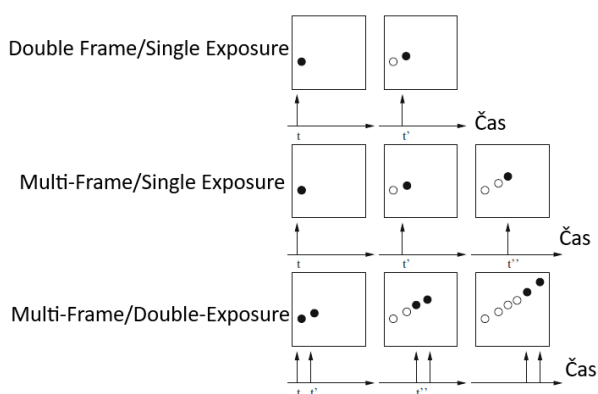
V posledních letech s vývojem LED technologií dochází k jejich častějšímu užívání i pro PIV měření. Hlavní rozdíl mezi LED a lasery je v tom, že LED vyzařuje ve výrazně širším spektru. Díky tomu nedochází k pozorovatelným flekům na zařízení. Dalšími výhodami je jednodušší operace se zařízením a to, že můžeme světlo jednoduše rozpulzovat. Hlavní nevýhodou LED zůstává neochota vytvořit z něj světelný list. [16]

### 3.4 Záznam měření

Záznam měření můžeme rozdělit do dvou hlavních kategorií. První z nich je metoda, při které zachycujeme snímky ozářených částic za více časových kroků na jeden snímek (single-frame exposure). Druhou metodou je zachycení každého časového okamžiku na jeden snímek (multi frame/single exposure). [16]



*Obr. 41: Technika více časových okamžiků na jednom snímku [16]*



*Obr. 42: Technika jednoho časového okamžiku na jednom snímku [16]*

Hlavním rozdílem u první uvedené techniky je, že nedokážeme bez dalšího přidaného značení uvést, který z bodů nastal, v jaký časový okamžik. Díky tomu neumíme říct, jak se částice pohybuje. U druhé metody tento nedostatek nevzniká, a díky tomu jsme schopni stanovit, jak se částice pohybuje. V dnešní době se převážně používá druhá metoda (multi-frame/single-exposure). [16]

### **Digitální kamery pro PIV**

V dnešní době používají digitální kamery dva základní typy senzorů. CCD senzor, který převádí světlo na elektrický proud pomocí fotoelektrického jevu. Na druhé straně máme CMOS senzor, který zachytává světlo pomocí tranzistorů. V posledních desetiletích se CMOS technologicky velmi posunul a využívá se čím dál více. [16]

Každý ze senzorů se dá použít v určitých případech. CCD má prozatím kvalitnější obraz, avšak pokud potřebujeme fotit s velkou frekvencí, vyplatí se použít kameru se senzorem CMOS. Dále má tento typ kamer problém se špatně osvětlenými prostory, kdy může dojít k zachycení obrazu plného šumu. [8] Nejnovější CMOS kamery mohou dosahovat frekvence až několika kHz. [24]

## **3.5 Metody vyhodnocení snímků**

Hlavním úkolem vyhodnocení snímků je zjistit změnu polohy přidaných částic, a tím zjistit vektor rychlosti proudění. V počátcích PIV měření se toto vyhodnocení provádělo ručně. S nástupem počítačů však docházelo k automatizaci tohoto kroku. Sledování jednotlivých částic je prakticky použitelné pouze v případě jejich malé hustoty při proudění. Pokud použijeme částic víc a už nedokážeme vizuálně rozeznat jednotlivé částice, musíme použít statistické metody vyhodnocení.

S vývojem počítačů se přešlo na digitální hodnocení PIV. Z počátku se zaměřilo na hodnocení single-exposure/double frame PIV pomocí korelačních metod. Dnes už dokážeme hodnotit digitálně i multi-frame/single-exposure. [16]

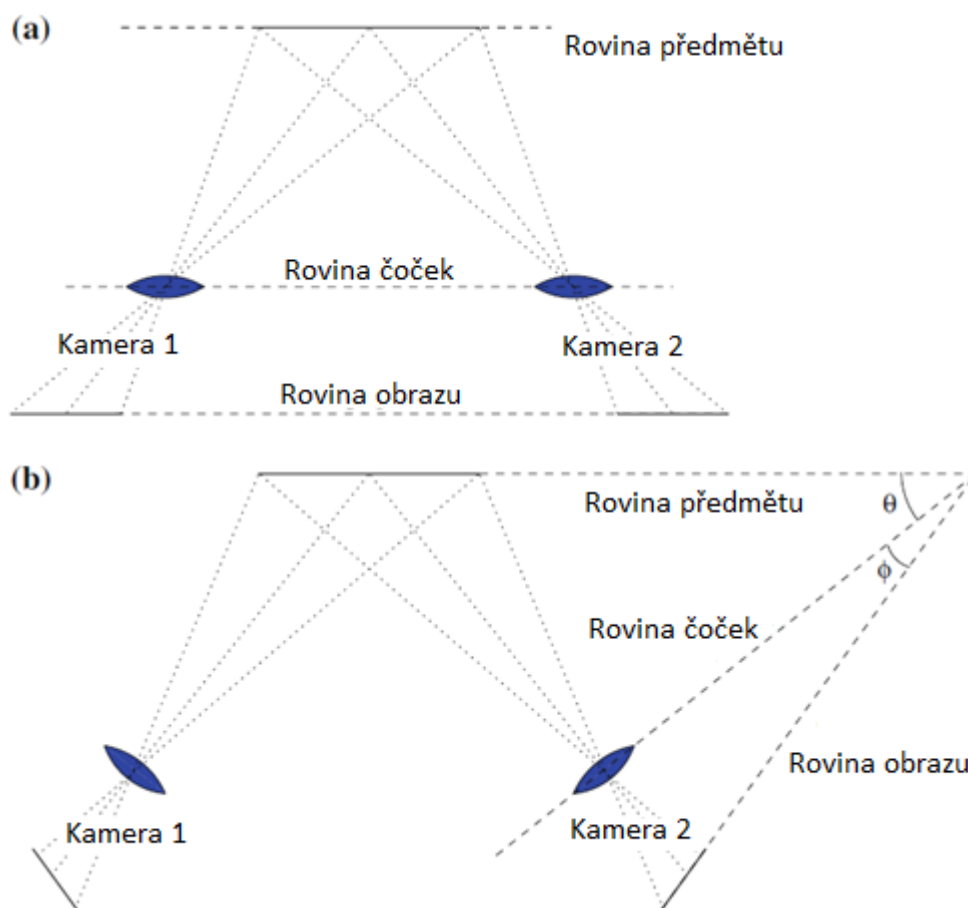
## **3.6 Stereoskopické PIV**

Hlavní nevýhodou klasického PIV měření je jeho schopnost měřit pouze ve 2D. Proto byla vyvinuta metoda stereoskopického PIV měření, která využívá přítomnosti druhé kamery, díky které dokážeme zachytit vektory rychlostí ve 3D. Rozšířením stereoskopického PIV je takzvané multiplane PIV, které využívá čtyř kamer a čtyř laserů. [7]

Pro využití stereo PIV musíme rozhodnout, jaký úhel bude mezi našimi kamerami. Pro většinu případů však použijeme velikost úhlu  $90^\circ$ . Existují dvě nastavení známé jako translační metoda a jako technika úhlového posunutí.

Translační metoda využívá svého postavení tak, že zvětšení po celé sledované ploše je konstantní. Další výhodou je dobré zaostření všech částic. Velkou nevýhodou této metody je omezená vzdálenost čoček. Metoda techniky úhlového posunutí je postavena na sladění čoček

se směrem pohledu. Tímto postupem sice vyřešíme omezenou vzdálenost čoček, avšak zkreslíme snímek. [16]



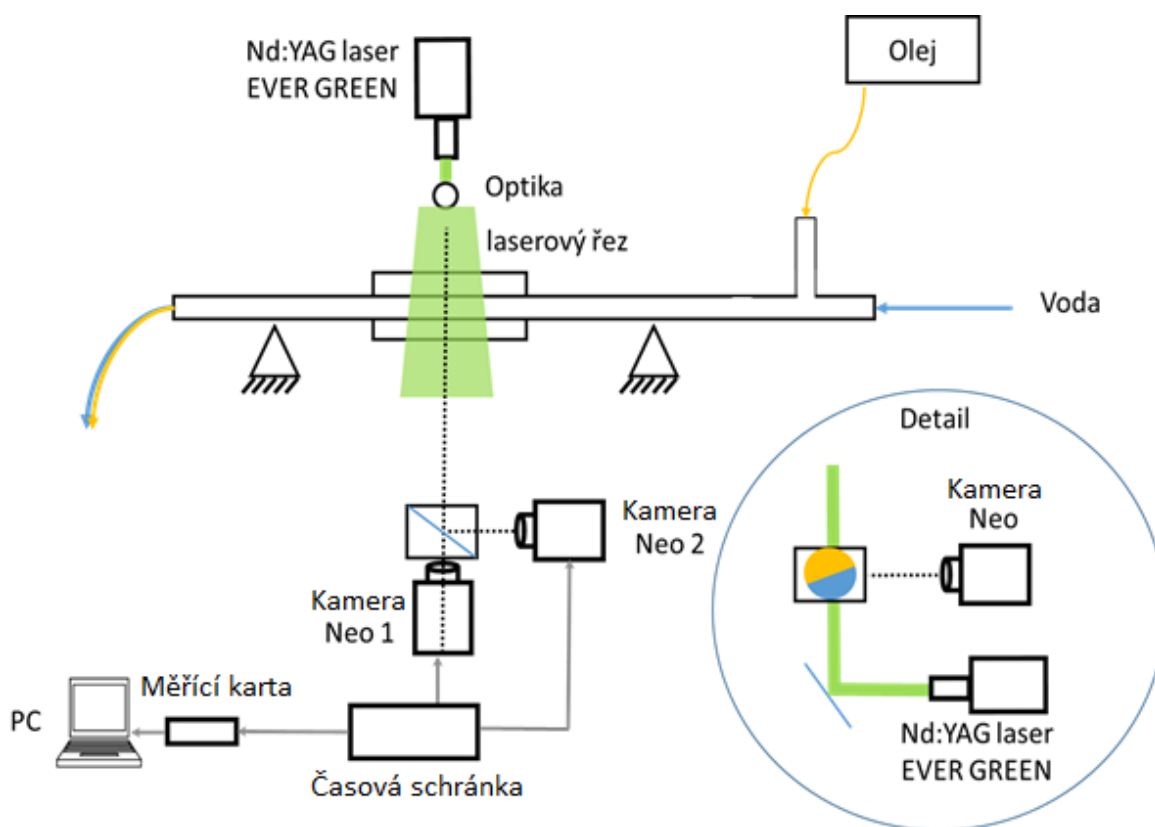
**Obr. 43:** Základní nastavení stereoskopického PIV a) Translační metoda b) Technika úhlového posunutí [16]

Dále u stereoskopického PIV musíme řešit rekonstrukci geometrie. Je nutné zkombinovat jednotlivé výsledky rychlostí a pomocí matematických výpočtů dopočítat reálné vektory rychlostí v prostoru. Také nesmíme zapomenout na kalibraci kamer.

Měření stereoskopického PIV v kapalinách přináší další problémy, které vyžadují řešení. Hlavním problémem je optická odchylka v důsledku velké změny hustoty na rozhraní vzduchu a zkoumané kapaliny. Jedním z řešení, jak se této odchylce vyhnout, je vytvoření hranolu naplněného stejnou kapalinou jako je ta, kterou sledujeme. [16]

### 3.7 Experimentální měření pomocí PIV

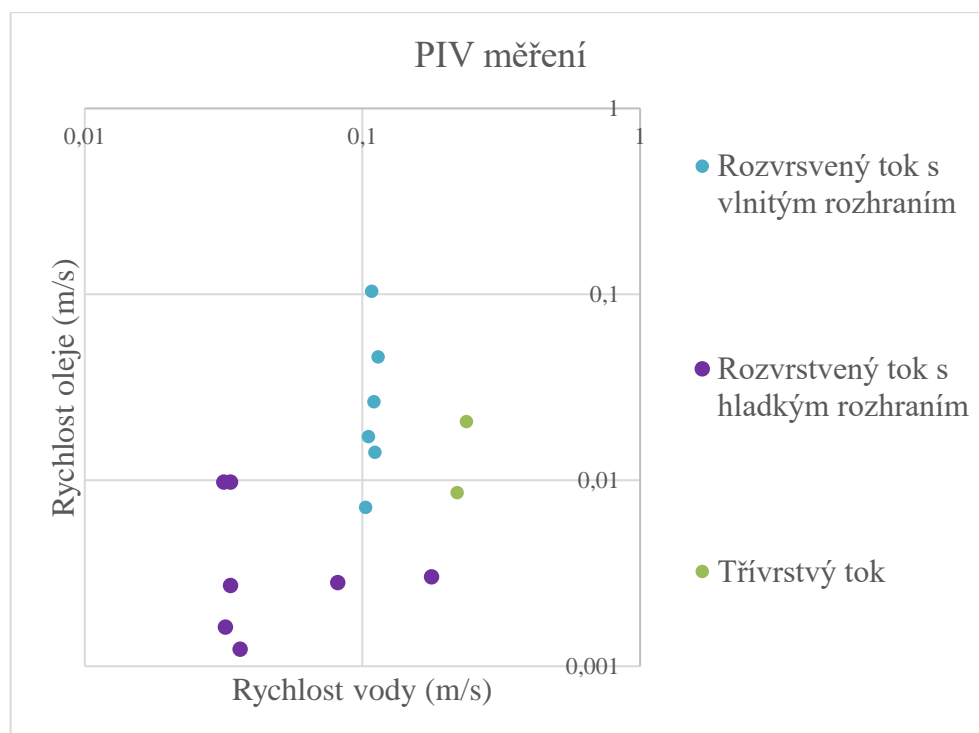
Na experimentální trati proběhlo také PIV měření. K měření byl použit laserový anemometrický systém pracující na principu PIV, kdy se měřila proudová pole jak v oleji, tak ve vodě. Byl použit laser Quantel Evergreen HP 340 mj s délkou pulzu 10 ns o vlnové délce 532 nm. Tento laser byl následně opticky zaveden do svisle měřící oblasti. K zachycení sloužily dvě kamery Dantec Neo s rozlišením 5,5 Mpx s optickou vzdáleností 200 mm. [9]



**Obr. 44:** Uspořádání experimentu a měřícího systému [9]

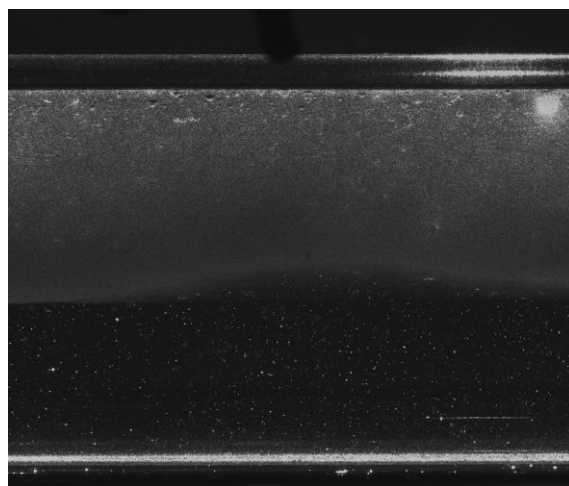
Do každé z kapalin byly přidány stopovací částice. Voda byla nasycena polyamidovými částicemi s rhodaminovým povlakem, který zajišťuje fluorescenční schopnost částic. Maximální intenzity fluorescenční jev dosáhne při 580 nm, kdy je emitováno oranžové světlo. Proto byl na kameru nasazen filtr propouštějící záření v blízkosti této vlnové délky, což vedlo k zaznamenání světla v její blízkosti. Olej byl nasycen stříbrnými prachovými částicemi. Ty emitovaly světlo při 532 nm, díky čemuž se na kamery v tomto případě nemusel žádný filtr přidávat. [9]

Celkem bylo zaznamenáno 17 měření, u kterých jsme pozorovali 3 typy režimů toku. Rozvrstvený tok s hladkým rozhraním, rozvrstvený tok s vlnitým rozhraním a třívrstvý tok. Pro každé měření bylo zaznamenáno 200 dvojic snímků s frekvencí 10 Hz. [9]



Obr. 45: Mapa PIV měření

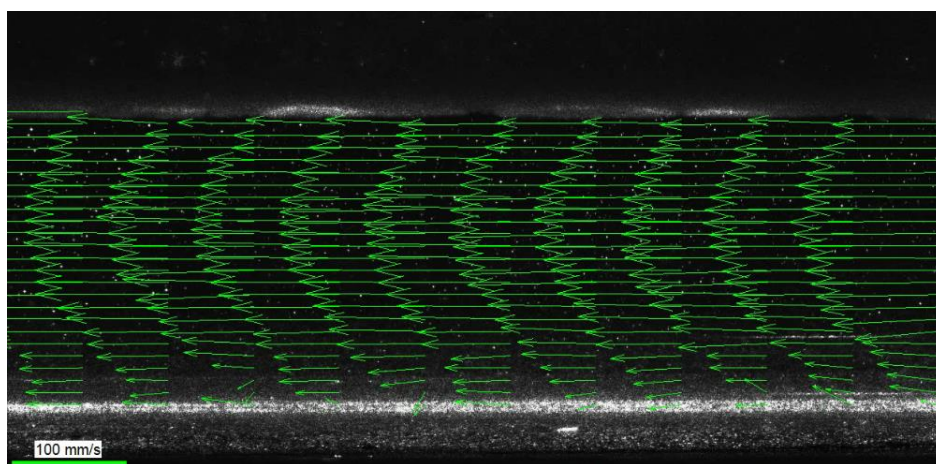
Jednotlivé dvojice snímků byly pomocí algoritmu analyzovány a následně pro každé médium vytvořeny vektorové mapy proudění. [9]



Obr. 46: Vyfocené fotografie 1) olejová část 2) vodní část [9]

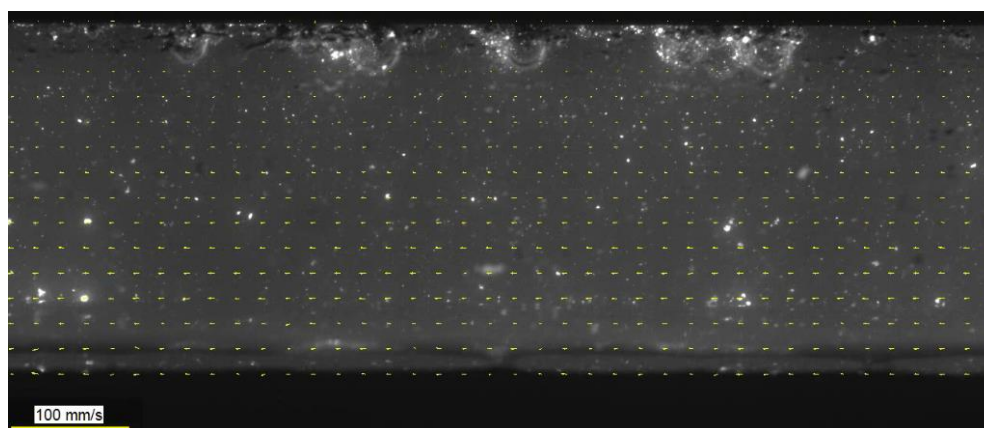
### Rozvrstvený tok s hladkým rozhraním

U rozvrstveného toku s hladkým rozhraním můžeme pozorovat průběhy vektorů rychlostí. Snímky jsou v našem případě pořízeny při rychlostech 0,032 m/s vody a 0,0016 m/s oleje. Rychlost vody je tedy je přibližně 30x větší než rychlost oleje. Profil rychlosti vody vytváří parabolou. Rychlost se zvyšuje z nulových hodnot na potrubí až na maximum, které se nachází přibližně ve 2/3 průřezu vody. Poté následuje snižování rychlosti až k oblasti na rozhraní mezi kapalinami. Většina vektorů směřuje stejným směrem, což nám společně s parabolickým tvarem profilu dokazuje výskyt laminárního proudění.



**Obr. 47:** Průběh vektorů rychlostí ve vodě pro rozvrstvené tok s hladkým rozhraním [9]

Na snímku zachycujícím rychlosti oleje dochází ke stejné situaci s tím rozdílem, že rychlosti jsou mnohonásobně menší. Profil má znovu přibližně parabolický tvar, kdy rychlost narůstá z nulové rychlosti na maximální hodnotu, po které dochází ke snižování rychlosti až k rozhraní s vodou. Na rozhraní kapalin nedochází k přestupu ani jedné fáze a kapaliny vedle sebe tečou.

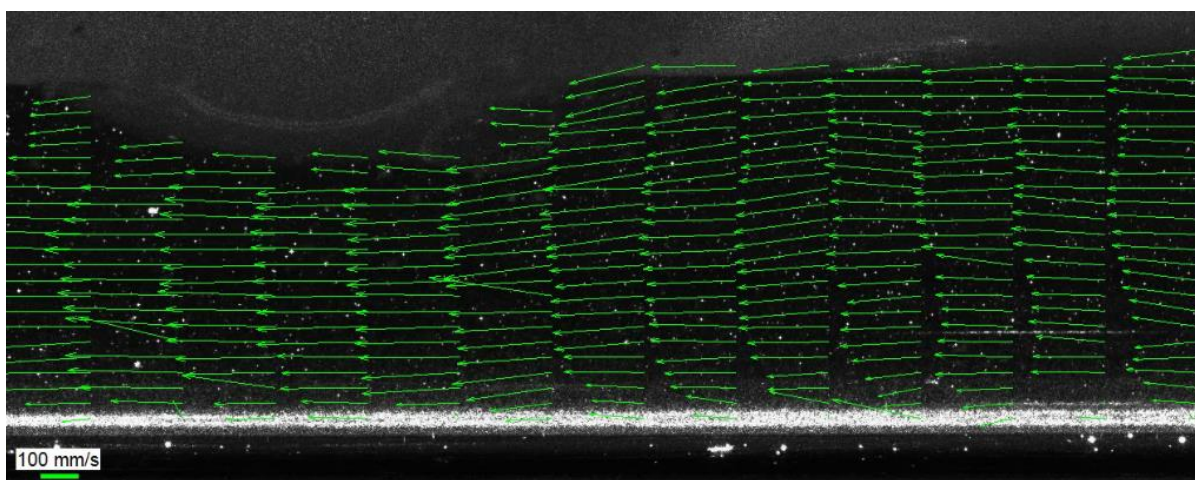


**Obr. 48:** Průběh vektorů rychlostí v oleji pro rozvrstvené tok s hladkým rozhraním [9]



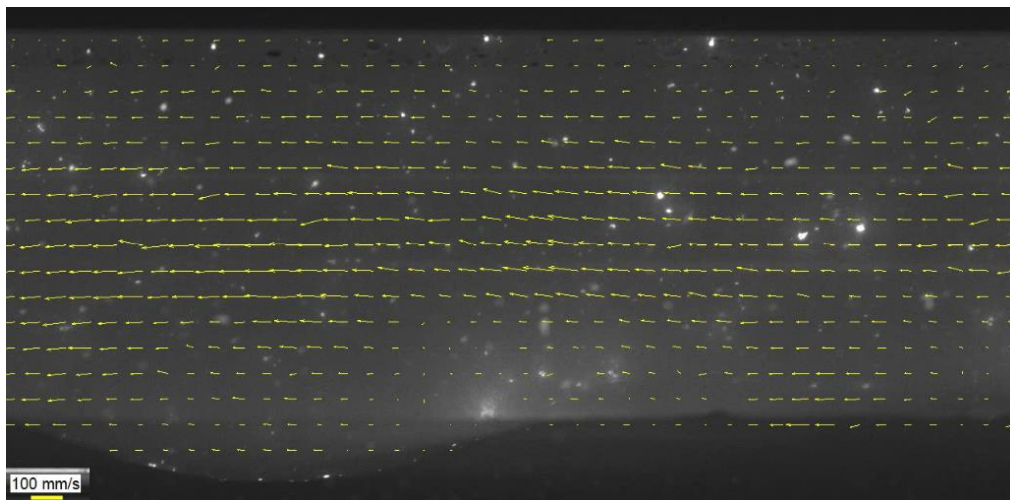
### Rozvrstvený tok s vlnitým rozhraní

Tok s vlnitým rozhraním se začne vyskytovat při vyšších rychlostech kapalin. Voda pro námi zaznamenané měření má vstupní rychlost 0,11 m/s a olej 0,026 m/s. Na zobrazených obrázcích vidíme rozvrstvený tok s výskytem jedné vlny. Na obr. 49 zobrazujícím vektory rychlostí ve vodní části toku vidíme, že profil přestal být čistě parabolický a ve většině toku se rychlost vody drží přibližně konstantní. Rychlost znovu narůstá z nulové hodnoty na hranici s potrubím a na rozhraní s olejem dochází k jejímu snížení. Dochází také k častějšímu pohybu částice mezi vrstvami. Na snímcích pozorujeme vlnu, která výrazně ovlivňuje rychlosti kapaliny. V blízkém okolí vlny dojde ve vodě ke snížení rychlosti a mírné změně směru vektorů.



*Obr. 49: Průběh vektorů rychlostí ve vodě pro rozvrstvené tok s vlnitým rozhraním [9]*

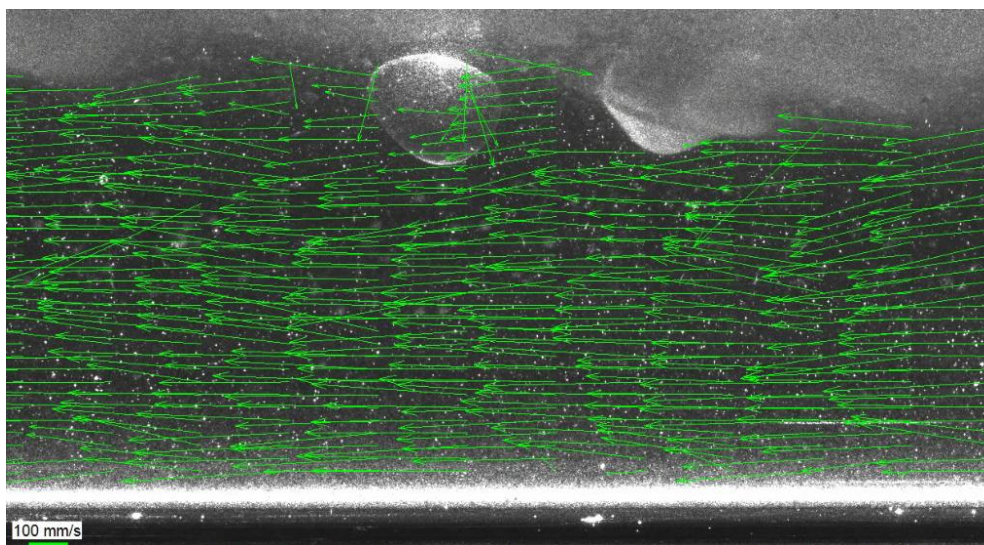
Vektory rychlostí v oleji jsou ovlivněny výrazněji. Pro námi pozorovanou rychlost se profil proudění výrazně mění. V pozorované oblasti dochází ke vzniku nestabilit, kde jejich vznik je způsoben výskytem vln. Před vlnou dochází ke zvýšení rychlosti a za vlnou ke vzniku zavírání.



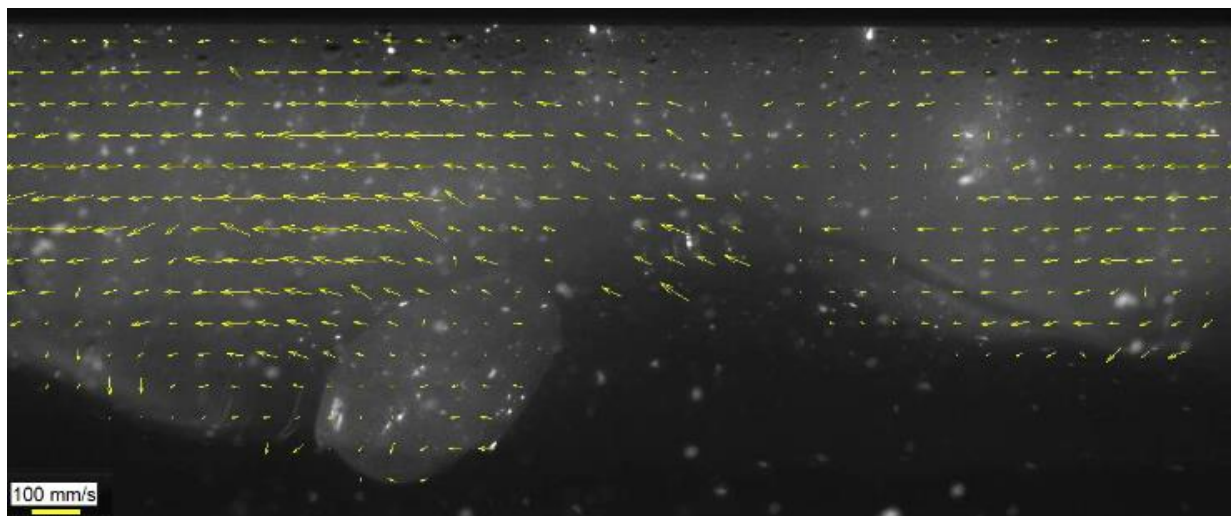
*Obr. 50: Průběh vektorů rychlostí v oleji pro rozvrstvený tok s vlnitým rozhraním [9]*

### **Třívrstvý tok**

Třívrstvý tok je pozorován při ještě vyšších rychlostech než rozvrstvený tok s vlnitým rozhraním. Pro námi pozorované rychlosti má voda vstupní rychlost 0,252 m/s. Olej má vstupní rychlost 0,0127 m/s. U snímku zachycující vektory rychlosti vody, vidíme výraznou proměnu proudění oproti rozvrstvenému toku. Na rozhraní kapalin se vytvořila kapka oleje, která proudí ve vodě. Kapka ovlivňuje pohyb vody tak, že voda musí kolem ní proudit. Díky tomu dochází k narušení směru vektorů a dochází i ke zpětnému toku vody. Zatímco v předchozích dvou případech byl směr vektorů ve vrstvách velmi výrazný a přechod částice z jedné vrstvy do druhé byl ojedinělý, tak při těchto rychlostech dochází k tomuto jevu výrazně častěji.



*Obr. 51: Průběh vektorů rychlostí ve vodě pro třívrstvý tok [9]*



*Obr. 52: Průběh vektorů rychlostí v oleji pro třívrstvý tok [9]*

Na snímku popisující pohyb oleje vidíme výskyt několika zavíření. Ty jsou způsobeny destabilizací toku na mezifázovém rozhraní, které vzniká velkým rozdílem viskozit. [15] Pro námi pozorovanou rychlost je důležité zvlněné rozhraní s oblastí vzniku kapky oleje. Směr vektorů se mění s místem výskytu, kde na vrcholu vlny je rychlost největší a v místech mezi maximálními amplitudami vln jsou rychlosti minimální. V této oblasti se také nejčastěji vyskytují zavíření. Dále pozorujeme vznik kapky oleje, která se začíná oddělovat z olejové fáze.

## 4 Simulace dvoufázového proudění

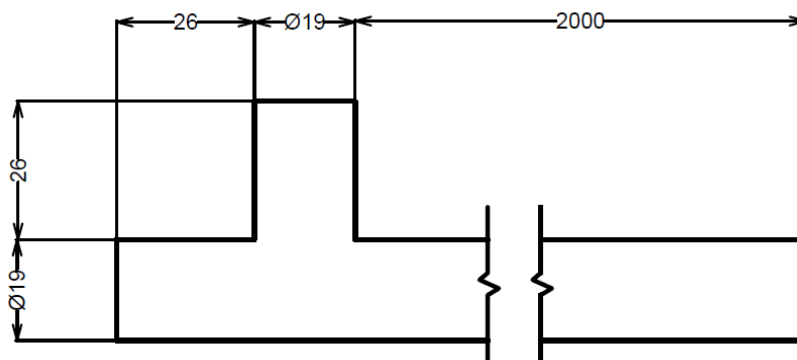
S rozvojem výpočetní techniky dochází k přechodu od experimentálního pozorování k simulaci proudění. Proto jsme v této diplomové práci vymodelovali jeden rozvrstvený tok pro několik typů geometrií. Simulovali jsme proudění ve 3D a 2D. Tyto výsledky jsme následně porovnali jak mezi sebou, tak i s experimentálním pozorováním. Pro simulaci jsme vzali vstupní rychlosti oleje a vody z vybraného režimu, díky čemuž můžeme tato proudění porovnat. Cílem simulace je dosáhnout stejných režimů toku.

Vstupní rychlost vody (m/s)	Vstupní rychlost oleje (m/s)	Režim
0,126	0,024	Rozvrstvený tok s vlnitým rozhraním

**Tab. 6:** Vybrané hodnoty rychlostí z experimentálního pozorování

### 4.1 Geometrie

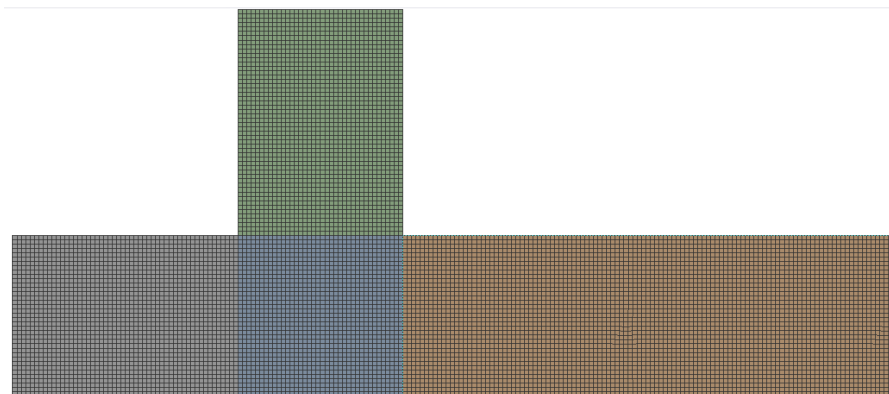
Za geometrii jsme vybrali t-kus a následné vodorovné potrubí. Všechny hodnoty byly stejné jako při experimentu, takže průměr potrubí byl 19 mm. T-kus byl speciálně vytvořen tak, aby v něm nebyly žádné vruby, což nám velmi usnadnilo tvorbu geometrie. Doména byla ještě zjednodušena tak, že oblast, kde každá z kapalin tekla sama, byla zkrácena na 26 mm. Délka vodorovného potrubí zůstala 2 metry.



**Obr. 53:** Rozměry domény

U síťování se používaly pouze čtyřúhelníkové a šestihranné prvky. Tyto prvky jsou výpočetně přesnější a také u nich dochází k rychlejší konvergenci. U 2D simulace byla pomocí rozřezání hran dosažena síť o velikosti jednoho prvku 0,5 mm. U 3D modelování bylo síťování komplexnější a využívalo se jak nařezání hran, tak byl na okraji potrubí využit faktor zvětšení.

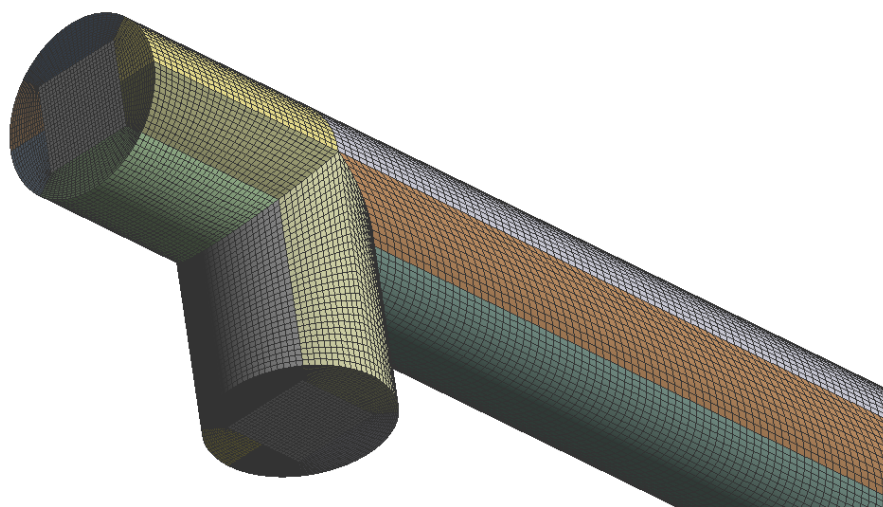




**Obr. 54:** 2D mesh

Počet prvků	157396
Počet uzlů	161577
Maximální šikmost prvku	0,035
Maximální poměr stran	1,036

**Tab. 7:** Parametry 2D sítě



**Obr. 55:** 3D mesh

Počet prvků	4152960
Počet uzlů	4256970
Maximální šikmost prvku	0,608
Maximální poměr stran	6,864

**Tab. 8:** Parametry 3D sítě

## 4.2 Výpočet

Simulace byly počítány v softwaru Ansys Fluent a k tomu využita metoda Volume of Fluid (VOF). Tento model je určen pro dvě a více vzájemně nemísitelných tekutin. Díky tomu je tento model optimální pro řešení našeho problému. VOF řeší jedinou sadu rovnic zachování hybnosti, které sdílejí obě kapaliny [19]. VOF bylo počítáno explicitně a byla uvažována implicitní síla. Explicitní řešení počítá tok z přechozího časového kroku, čímž se řešení zpřesňuje. Implicitní síla zlepšuje konvergenci v daném časovém okamžiku pomocí započítáním tlakového gradientu v momentových rovnicích. Z experimentálního pozorování jsme věděli, že rozhraní mezi fázemi má mít ostrý přechod, proto jsme s tímto typem přechodu počítali. Dále jsme uvažovali tzv. coupled level set a koeficient povrchového napětí roven 0,04164 [14].

Pro všechna řešení se počítalo s působením gravitace, která měla hodnotu 9,81 m/s. Simulace byla provedena pro velmi malé rychlosti, což ukazovalo na malé Reynoldsovo číslo. Díky tomu jsme mohli použít model laminárního proudění při výpočetní metodě PISO. U výpočtu momentu jsme zadali metodu QUICK a pro objemového množství metodu Geo-Reconstruct. Velikost časového kroku byla omezena Curantovým číslem, které udává posun prvků k síti. Pokud je Curantovo číslo větší jak jedna, tak výpočet nestihá počítat hodnoty pro každý element. [19] Proto jsme se snažili držet Curantovo číslo pod hodnotou 0,5.



Obr. 56: Typ režimu toku

## 4.3 Výsledky výpočtů

Celkem byly simulovány 3 typy výpočtů. Prvním z nich byla simulace toku oleje a vody s nátokem oleje shora ve 3D. Dále byly řešeny 2D simulace s nátokem oleje shora a následně zespodu. U každého výpočtu dochází ke vzniku vlnění později, než bylo pozorováno při experimentu. To je pravděpodobně způsobeno použitím konstantní rychlosti u průřezu nátoku oleje a vody. V reálných podmínkách nemají profily rychlostí pístový tvar.

### 3D Simulace s nátokem oleje shora

Při výpočtu proudění ve 3D potrubí jsme z důvodů vysoké výpočetní náročnosti vynechali postup, při kterém se nejdříve pustí do potrubí pouze voda a až následně otevře i přívod oleje. Proto jsme v první fázi simulace výpočet nechali běžet stacionárně. Po jeho konvergenci byl výpočet přepnut na transientní s časovým krokem 0,001 s.

Z výsledků vidíme, že v přední části potrubí nedochází k mísení vody a oleje a okamžitě vzniká rozvrstvený tok. Ten má nejdříve hladké rozhraní, avšak po několika centimetrech začíná docházet k zvlnění, které má nejdříve pravidelný tvar, ale s narůstajícím časem tato

pravidelnost mizí a vytvářejí se malé nepravidelné vlny s občasným výskytem větší vlny. Výrazným přínosem 3D simulace je možnost pozorovat i průřez v jednotlivých částech potrubí. Avšak pro tento režim toku u něj nedochází k jeho výrazným změnám.



*Obr. 57: 3D simulace – Vstupní část*



*Obr. 58: 3D simulace – Vznik nepravidelných vln*



*Obr. 59: 3D simulace – Vznik větších vln*



*Obr. 60: 3D simulace – Průřezy potrubí*

### 2D simulace s nátokem oleje shora

Výpočet 2D se celou dobu prováděl transientně, když jsme nejdříve nechali potrubím téct vodu s časovým krokem 0,01 s. Po průtoku vody celou délkou potrubí se otevřel i přívod oleje, po kterém jsme museli snížit časový krok na 0,001 s. Na počátku potrubí opět dochází ke vzniku rozvrstveného toku s hladkým rozhraním, které se po několika centimetrech zvlíní. Vlnité rozhraní se vyskytuje po celé zbývající délce potrubí.



*Obr. 61: 2D simulace s nátokem shora – Vstupní část*



*Obr. 62: 2D simulace s nátokem shora – Vznik nepravidelných vln*



*Obr. 63: 2D simulace s nátokem shora – Vznik větších vln*

## **2D simulace s nátokem oleje zespodu**

Pro tento typ simulace se nepodařilo napočítat dokonalý tvar režimu toku. Hlavním rozdílem bylo vytvoření kapek oleje ve spodní části potrubí, které jsou přítomny v celé doméně. Dalším nedostatkem simulace bylo velmi dlouhé zdržení oleje ve spodní části potrubí. To můžeme pozorovat na obr. 64.

Výpočet probíhal otevřením přívodu oleje do potrubí a následným otevřením vody. Časový krok při toku čistého oleje byl 0,01 s a při toku směsi 0,0005 s. Olej se po mírné prodlevě přesune na horní stranu potrubí, kde poté vytvoří rozvrstvený tok s vlnitým rozhraním. Tok je však výrazně odlišný od experimentálního pozorování. Tento rozdíl je způsoben hlavně výskytem kapek oleje, které se nachází na spodní hraně potrubí. Jejich existence ovlivní velikost vlny nad nimi. Avšak pokud vezmeme oblast na obr. 62, kde se na spodní hraně nevyskytuje olej, tak můžeme s rezervou konstatovat, že tato oblast simulace přibližně odpovídá experimentu.

Jednou z možností, jak tyto kapky eliminovat, je nechat simulaci běžet delší dobu, avšak s ohledem na rychlost pohybu kapek, by to bylo výpočetně náročné. Další řešením, jak přesněji popsat nátok zespodu, je vytvořit pro tento režim 3D doménu. V tom případě by kapky měly mít větší problém se na spodní části uchytit.



*Obr. 64: 2D simulace s nátokem zespodu – Vstupní část*





*Obr. 65: 2D simulace s nátokem zespodu – Vznik vlnění*



*Obr. 66: 2D simulace s nátokem zespodu – Průběh vlnění*



*Obr. 67: 2D simulace s nátokem zespodu – Koncová část potrubí*



*Obr. 68: 2D simulace s nátokem zespodu – Detail*



*Obr. 69: Experimentálně pozorovaný režim toku při nátoku zespodu [11]*

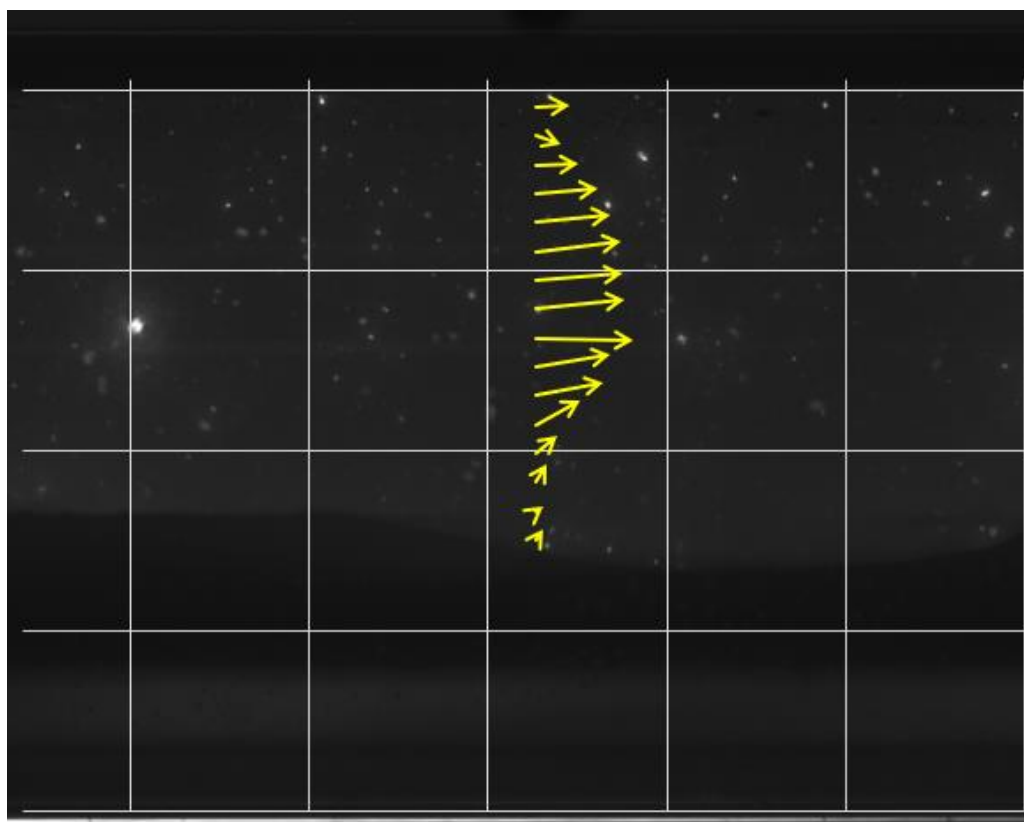
### Porovnání simulací

Pokud porovnáme experimentální pozorování s 3D a 2D simulací s nátokem oleje shora, tak získáme velmi podobné proudění. Rozdíl mezi 3D a 2D simulací je minimální a díky tomu můžeme říci, že pro tento typ proudění je možné získat dobré výsledky již z 2D výpočtu. Díky tomu simulace nebudou tak výpočetně náročné. Hlavní výhodou 3D výpočtu je možnost získat průřezy potrubí. Avšak tyto průřezy nabývají významu až pro režimy vznikající při větších rychlostech.

Při porovnávání nátoky oleje shora a zespodu vidíme, že pro naše vtokové rychlosti dochází pro oba nátoky k rozvrstvenému toku s vlnitým rozhraním, kde jediným výrazným pozorovaným rozdílem jsou délky jednotlivých vln. Pro nátok shora vznikají delší a méně výrazné vlny než pro nátok zespodu. Přestože jsme nedosáhli dokonalého výsledku pro nátok zespodu, vidíme, že vlny jsou zde výraznější.

## 4.4 Porovnání simulací s PIV

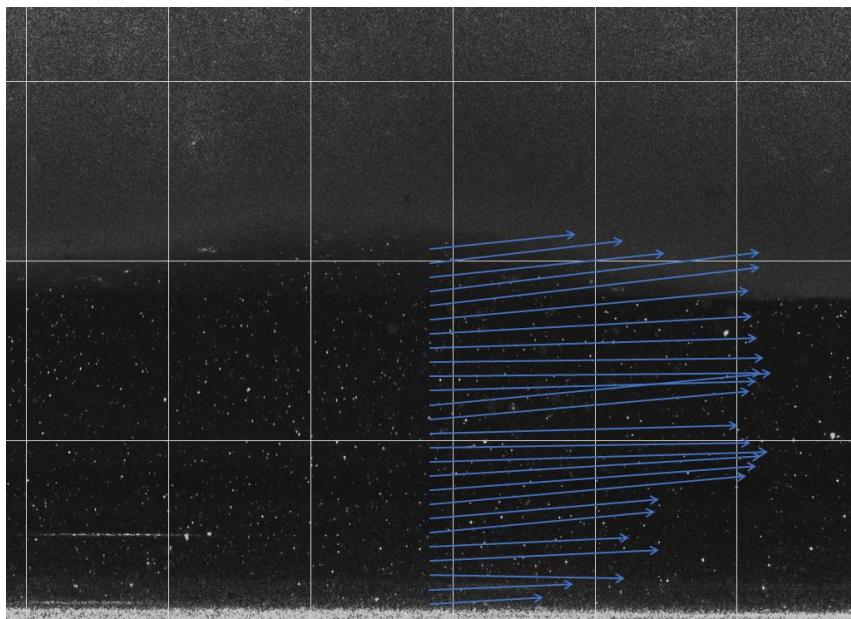
V poslední části diplomové práce jsme srovnali experimentálně zjištěné rychlosti s rychlostmi získanými numerickým výpočtem. Vektory rychlosti byly v obou případech pozorovány pro nátok oleje shora. Numerické vektory rychlosti byly počítány pro vstupní hodnoty 0,126 m/s pro vodu a 0,024 m/s pro olej. Tok jsme považovali za laminární. U PIV měření jsme nezískali měření se stejnými rychlostmi, proto jsme vzali hodnoty měření, které numerickým hodnotám nejvíce odpovídaly. Což bylo měření s rychlostí vody 0,108 m/s a oleje 0,026 m/s. Rychlosti jsou velmi podobné a měli by vést k podobným závěrům.



**Obr. 70:** Průběh vektorů rychlosti v oleji

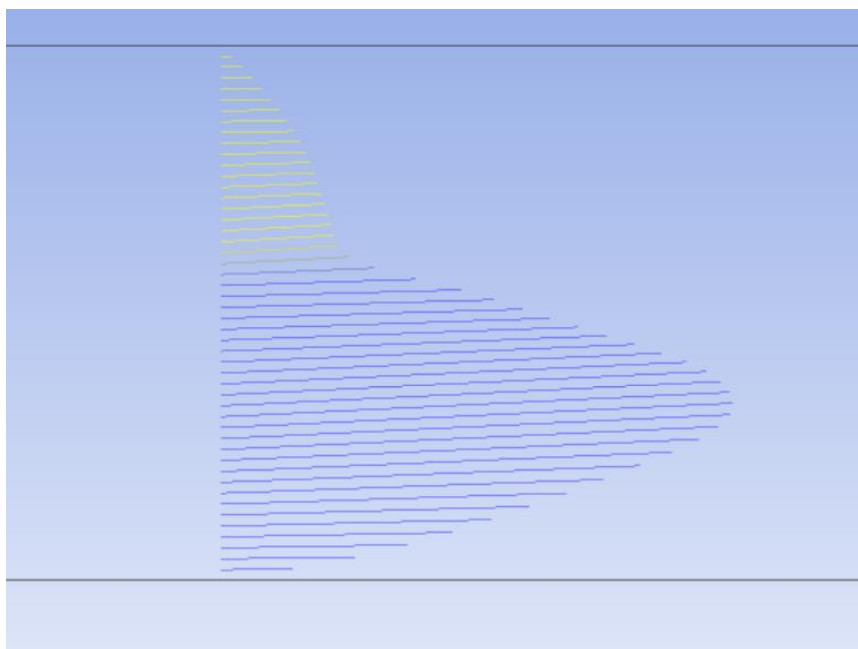
Vektory byly pozorovány přibližně ve vzdálenosti 80 centimetrů od t-kusu. V této oblasti je typ proudění ustálený a vyskytuje se rozvrstvený tok s vlnitým rozhraním. Za místo průběhu vektoru jsme vybrali olejovou vlnu. Vektory byly barevně odlišeny tak, že vektory rychlostí ve vodě měly modrou barvu a v oleji barvu žlutou.

Průběh vektorů rychlosti v oleji při reálných podmínkách měl tvar podobný parabole. Na hranicích je nejmenší rychlost a ve středu olejové fáze je rychlost nejvyšší. Specifikem průběhu jsou velmi malé rychlosti v oblasti sousedící s vodou.

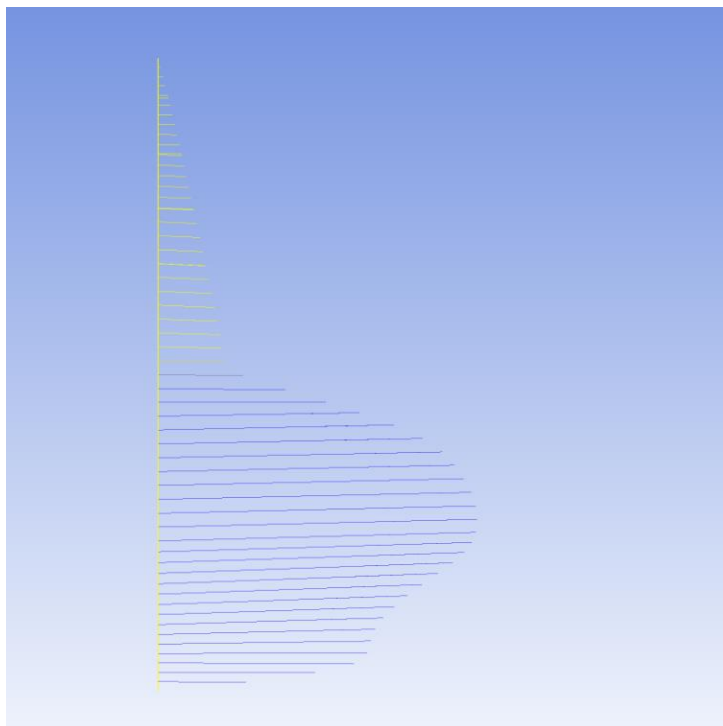


**Obr. 71:** *Průběh vektorů rychlosti ve vodě*

U PIV měření pro průběh vektorů rychlosti ve vodě dochází k parabolickému nárůstu rychlosti do doby, než dosáhneme maxima. Poté se rychlost ustálí na přibližně konstantní hodnotě, dokud nedojde k dostatečnému přiblížení k rozhraní kapalin.



**Obr. 72:** *Průběh vektorů ve 2D*



**Obr. 73:** *Průběh vektorů ve 3D*

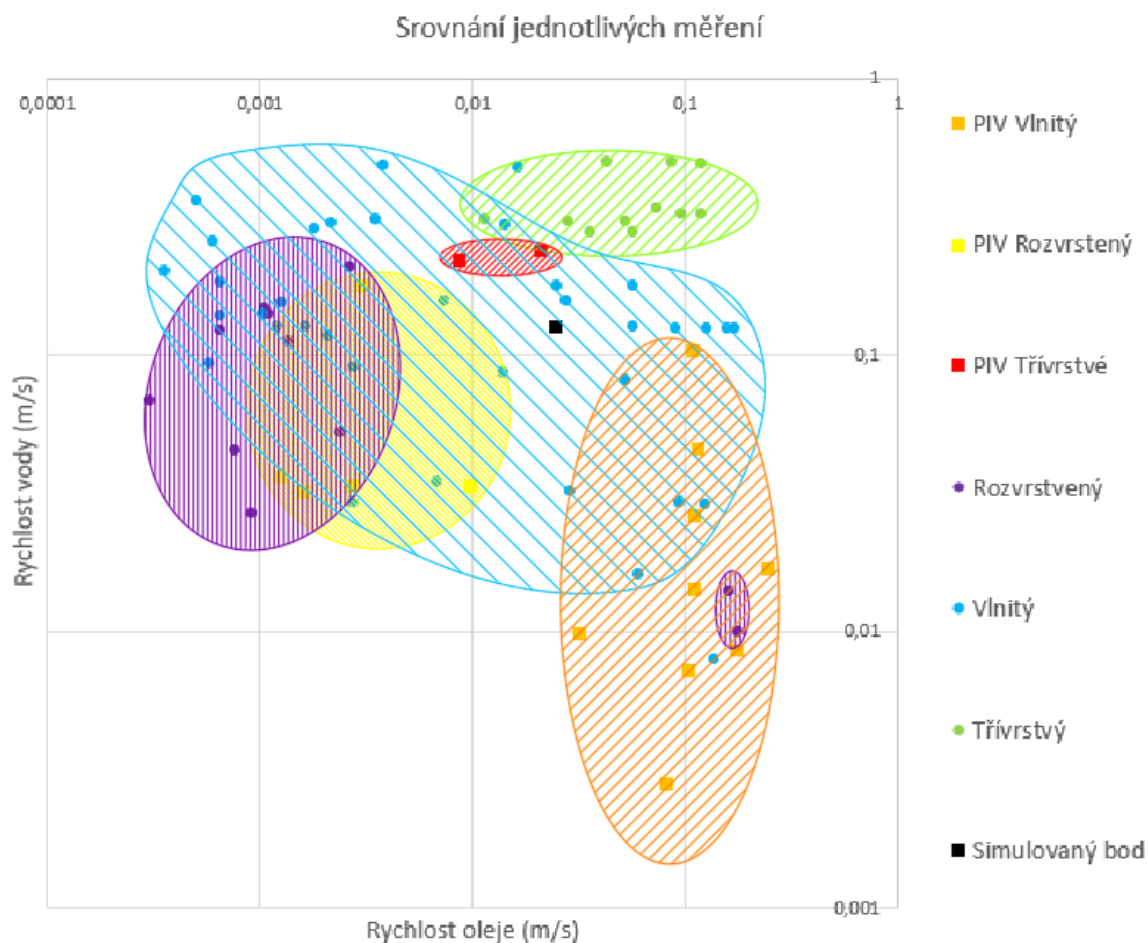
Pokud srovnáme vektory rychlosti získané numericky ve 2D a 3D, tak pozorujeme, že olejová část dosahuje maxima na rozhraní kapalin. U 2D proudění má nárůst rychlosti parabolický tvar. Pro 3D proudění je nárůst spíše lineární. Vektory rychlosti ve vodě mají ve 2D dokonalý parabolický tvar, zatímco ve 3D se tvar paraboly jen přibližuje. Nárůst od rozhraní s olejem parabolu připomíná, avšak po dosažení maximálních velikostí rychlosti a následnému snižování hodnot, dochází u vektorů blízkých stěně potrubí ke zpomalení poklesu rychlostí a poté ke skokovému snížení rychlostí na nulovou hodnotu.

U srovnávání experimentálně a numericky zjištěného průběhu vektorů, dochází k zásadním rozdílům. Nejvýraznější odchylkou je naprosto jiný průběh vektorů v olejové fázi. Jak již dříve bylo zmíněno, tak u PIV měření dochází na rozhraní ke snížení velikosti rychlosti na téměř nulovou hodnotu. Oproti tomu u simulovaného proudění získáváme na rozhraní maximální rychlost v olejové fázi. Dalším námi pozorovaným rozdílem je výrazná odchylka v průběhu rychlostí ve vodě, kdy u PIV pozorování dochází k udržení konstantní maximální velikosti po většinu průřezu vody. U simulací získáváme parabolické tvary průřezu.

Rozdíly jsou pravděpodobně způsobeny nedokonalé zadanými podmínkami pro simulaci. U simulace se počítalo s laminárním prouděním, což neodpovídá dokonale reálným podmínkám. V proudění může docházet k výskytu nestabilních mezifázových módů, které jsou způsobeny rozdílnou viskozitou fází. [15] Dále se kapaliny na rozhraní i přes jejich nemísitelnost mírně mísí. Na rozhraní tak vzniká velmi malé množství emulze, která může ovlivňovat proudění. Řešením, jak vylepšit simulační výsledky, je více specifikovat chování kapalin na rozhraní. Například definováním kontaktního úhlu mezi kapalinami.

## 4.5 Srovnání experimentálních měření

V této diplomové práci byly provedeny dva typy experimentálních měření, které jsme vzájemně srovnali. Bylo provedeno experimentální a PIV měření. Na obr. 74 jsou zobrazeny provedená měření i s bodem, který byl simulován. Pokud srovnáme jednotlivé oblasti, tak vidíme, že jejich polohy si přibližně odpovídají. Oblasti třívrstvého a rozvrstveného toku si přibližně odpovídají s tím, že oblasti se částečně překrývají a odchylka mezi nimi není výrazná. Významný rozdíl nastává u vlnité oblasti, kde u PIV měření dochází k překrytí rozvrstvené oblasti. Tento rozdíl je pravděpodobně způsoben subjektivním hodnocením režimu toku, kde u PIV měření byly získány velmi přesné záznamy, kde sebemenší vlnka vede k označení režimu toku jako vlnitý.



Obr. 74: Srovnání jednotlivých měření

## Závěr

Tato diplomová práce se zabývala problematikou proudění nemísitelných kapalin. Jedním z cílů bylo studium chování dvou nemísitelných kapalin na jejich rozhraní. V první kapitole jsme se věnovali teorii dvoufázového proudění, kde blíže popsali fázové rozhraní. Dále se uvedly typy mísení kapalin, kde nás zajímalo hlavně proudění nemísitelných kapalin. Při proudění dvou nemísitelných kapalin v horizontálním potrubí dochází ke vzniku 9 režimů toku. Tyto toky jsme vyjmenovali a přesněji popsali. Režimy je možné vykreslit do univerzální mapy.

Následující kapitola se věnovala experimentálnímu měření, kde se pozorovalo proudění vody a oleje v horizontálním potrubí s nátokem oleje shora. Při tomto experimentu se nám podařilo pozorovat celkem pět režimů toku, a to od rozvrstveného toku s hladkým rozhraním až po disperzní tok. Výskyt režimů odpovídal teoretickým poznatkům. Všechny režimy byly zaznamenány a sepsány do několika grafů. Z těchto grafů jsme vypožadovali, že pro velmi malé rychlosti dochází k rozvrstvenému toku s hladkým rozhraním, u kterého zvyšováním rychlosti dojde k vytvoření vln na rozhraní. Pokud došlo ještě k výraznějšímu zrychlování kapalin, tak velikost vln přesáhne kritickou hodnotu a začne docházet k třívrstvému toku. Třívrstvý tok definujeme jako proudění, ve kterém můžeme pozorovat, jak již z názvu vyplývá, tři vrstvy. A to vrstvu oleje, vody a vodu s kapkami oleje. Při pokračování navyšování vstupní rychlosti dojde k disperzi. Konec kapitoly byl věnován srovnání výskytu jednotlivých režimů při různém nátoku oleje do trati. Námi změřené hodnoty byly srovnány s naměřenými hodnotami Ing. Malé [14], kdy byly všechny hodnoty zadány do grafů a porovnány oblasti výskytů jednotlivých režimů toku. Nejvýznamnějším rozdílem, který byl pozorován, je nepřítomnost přerušovaného toku při nátoku oleje shora. Dále změna nátoku ovlivňovala oblasti výskytu jednotlivých režimů, kde třívrstvý tok a rozvrstvený tok s hladkým rozhraním se při nátoku zespodu nacházejí v oblasti rozvrstveného toku s vlnitým rozhraním pro nátok shora.

Třetí kapitola se věnovala PIV měření, kde jsme nejdříve toto měření teoreticky popsali. Začátek kapitoly přiblížil princip samotného měření a následně jsme popsali jednotlivé části potřebné k jeho úspěšnému provedení. Od výběru správných částic přidávaných do kapaliny až po typ laseru použitého k nasvícení pozorované oblasti. Další část kapitoly popsala experimentální pozorování PIV měření, kdy byly do kapalin přidány částice, pomocí kterých jsme byli schopni zjistit průběh vektorů rychlosti v obou kapalinách. V této části experimentu se podařilo pomocí PIV zaznamenat 3 typy režimů toku. Prvním z nich byl rozvrstvený tok s hladkým rozhraním, u kterého vektory míří ve směru proudění a nevznikají žádné víry. Dalším byl rozvrstvený tok s vlnitým rozhraním, kde se na rozhraní vytvářejí vlny. U tohoto režimu již vznikají ojedinělé víry v olejové fázi. Posledním pozorovaným prouděním byl třívrstvý tok. V tomto případě se z olejové části odpoutávají kapky oleje. Kolem nich proudí voda, což má za následek i lokální obrát směru proudění vody. Překvapivým jevem byl častější výskyt zavírání v olejové fázi.

Poslední kapitola se věnovala simulaci nemísitelného proudění, která proběhla v softwaru Ansys Fluent. Pro výpočet byla použita metoda VOF, bylo vybráno jedno z experimentálních měření s rozvrstveným režimem toku s vlnitým rozhraním. Proudění bylo simulováno jak pro 3D, tak i pro 2D potrubí, kdy se v obou případech podařilo napočítat odpovídající režim toku. Díky tomu můžeme poznamenat, že pro základní pozorování pohybu nemísitelných kapalin

stačí simulovat pouze ve 2D potrubí. Tím se výrazně zjednoduší výpočtová náročnost simulace. Dále se nasimulovalo 2D potrubí s nátokem oleje zespodu, avšak v tomto případě se nepodařilo dosáhnout dokonalé podobnosti s očekávaným prouděním. Vznikaly zde kapky oleje zachycené na spodní části potrubí, což ovlivňovalo vlnění na rozhraní kapalin. Tento nedostatek by pravděpodobně bylo možno vyřešit případným prodloužením výpočetní doby simulace.

Poslední část diplomové práce srovnávala experimentálně získané vektory rychlosti s rychlostmi, které byly získány numerickým výpočtem. Vzájemně porovnávané vektory rychlosti si neodpovídají. U PIV měření jsou rychlosti v oleji na rozhraní minimální, v simulaci mají rychlosti v této oblasti maximum. Dalším nedostatkem je průběh rychlostí ve vodě, kdy si v reálném případě kromě hraničních hodnot, vektory rychlosti drží přibližně konstantní hodnotu. U simulací mají vektory parabolický průběh. Tento nedostatek je pravděpodobně způsoben použitím laminárního proudění ve výpočtovém řešení.

Diplomová práce splnila všechny zadané cíle. Byly zde teoreticky shrnuty základní informace o dvoufázovém proudění a PIV měření. Tyto teoretické poznatky byly potvrzeny experimentálním měřením, kdy teorie byla pozorována v praxi. Část měření byla provedena pomocí PIV, které je z širšího pohledu velmi významnou částí studie. K pozorování proudění nemísitelných kapalin pomocí PIV nedochází z důvodů její náročnosti často, proto neexistuje mnoho publikací, která se této problematice věnují. Nakonec byla vytvořena simulace jednoho režimu toku. Všechny získané výsledky jsme vzájemně porovnali.

Budoucí studium tohoto tématu by se mohlo zabývat prouděním pro vyšší rychlosti kapalin. Dále by se mohlo vytvořit více numerických simulací pro různé režimy toku, u kterých by se zlepšila definice na rozhraní kapalin a jejich okrajové podmínky. Proudění by se také lišilo při použití jiného typu směšovacího kusu. Pro matematický popis vektorů rychlosti by bylo vhodné použít komplexnější typ proudění a lépe definovat vlastnosti na rozhraní kapalin.



## Seznam použitých zdrojů

- [1] ANGELI, Panagiota. *Liquid-liquid dispersed flows in horizontal pipes*. London, 1997. Diplomová práce. Imperial College, University of London.
- [2] ANGELI, P a G.F HEWITT. Flow structure in horizontal oil–water flow. *International Journal of Multiphase Flow* [online]. 2000, **26**(7), 1117-1140 [cit. 2021-03-11]. ISSN 03019322. Dostupné z: doi:10.1016/S0301-9322(99)00081-6
- [3] BARTOVSKÁ, Lidmila a Marie ŠIŠKOVÁ. *Fyzikální chemie povrchů a koloidních soustav*. Vyd. 5., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 80-708-0579-X.
- [4] BROSSARD, C, J.C. MONNIER, P. BARRICAU, F.X. VANDERNOOT, Y. LE SANT, et al.. *Principles and applications of particle image velocimetry*. AerospaceLab, 2009, p. 1-11. hal-01180587
- [5] BUCKINGHAM, E. On Physically Similar Systems; Illustrations of the Use of Dimensional Equations. *Physical Review* [online]. 1914, **4**(4), 345-376 [cit. 2021-5-5]. ISSN 0031-899X. Dostupné z: doi:10.1103/PhysRev.4.345
- [6] ELSETH, Geir. *An Experimental Study of Oil/Water Flow in Horizontal Pipes*. Porsgrunn: Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi, 2001. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/11250/231212>
- [7] GAYDON, M., M. RAFFEL, C. WILLERT, M. ROSENGARTEN a J. KOMPENHANS. Hybrid stereoscopic particle image velocimetry. *Experiments in Fluids* [online]. 1997, **23**(4), 331-334 [cit. 2021-03-11]. ISSN 0723-4864. Dostupné z: doi:10.1007/s00348005011
- [8] HAIN, Rainer, Christian J. KÄHLER a Cam TROPEA. Comparison of CCD, CMOS and intensified cameras. *Experiments in Fluids* [online]. 2007, **42**(3), 403-411 [cit. 2021-03-11]. ISSN 0723-4864. Dostupné z: doi:10.1007/s00348-006-0247-1
- [9] HUDEC, M. KOTEK, M. JAŠÍKOVÁ, D a FIALOVÁ, S. PIV měření nemísitelných kapalin (voda + olej) Výzkumná zpráva: VUT-EU13303-QR-09-20 Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2020, 8 s.
- [10] HULST, H. C. van de. *Light scattering by small particles*. New York: J. Wiley, 1957.
- [11] IBARRA, R, I ZADRAZIL, Cn MARKIDES a Ok MATAR. Towards a Universal Dimensionless Map of Flow Regime Transitions in Horizontal Liquid-Liquid Flows. *Department of Chemical Engineering, Imperial College London, London, SW7 2AZ, United Kingdom*:



*Conference: 11th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Kruger National Park, South Africa* [online]. 2015 [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: [http://hdl.handle.net/10044/1/51076\\$\\$EView\\_full\\_text\\_in\\_Spiral\\_\(Access\\_may\\_be\\_restricted\)](http://hdl.handle.net/10044/1/51076$$EView_full_text_in_Spiral_(Access_may_be_restricted))

- [12] IBARRA, Roberto, Ivan ZADRAZIL, Omar K. MATAR a Christos N. MARKIDES. Dynamics of liquid–liquid flows in horizontal pipes using simultaneous two–line planar laser–induced fluorescence and particle velocimetry. *International Journal of Multiphase Flow* [online]. 2018, **101**, 47-63 [cit. 2021-5-14]. ISSN 03019322. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2017.12.018
- [13] KUMARA, W.A.S., B.M. HALVORSEN a M.C. MELAAEN. Particle image velocimetry for characterizing the flow structure of oil–water flow in horizontal and slightly inclined pipes. *Chemical Engineering Science* [online]. 2010, **65**(15), 4332-4349 [cit. 2021-5-14]. ISSN 00092509. Dostupné z: doi:10.1016/j.ces.2010.03.045
- [14] MALÁ, Kateřina. *Studium proudění nemísitelných kapalin*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124883>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Simona Fialová.
- [15] Ó NÁRAIGH, L., P.D.M. SPELT, O.K. MATAR a T.A. ZAKI. Interfacial instability in turbulent flow over a liquid film in a channel. *International Journal of Multiphase Flow* [online]. 2011, **37**(7), 812-830 [cit. 2021-5-6]. ISSN 03019322. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2011.02.010
- [16] RAFFEL, Markus, Christian E. WILLERT, Fulvio SCARANO, Christian J. KÄHLER, Steve T. WERELEY a Jürgen KOMPENHANS. *Particle Image Velocimetry* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2018 [cit. 2021-03-11]. ISBN 978-3-319-68851-0. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-68852-7
- [17] RUSSELL, T. W. F., G. W. HODGSON a G. W. GOVIER. Horizontal pipeline flow of mixtures of oil and water. *The Canadian Journal of Chemical Engineering* [online]. 1959, **37**(1), 9-17 [cit. 2021-5-14]. ISSN 00084034. Dostupné z: doi:10.1002/cjce.5450370104
- [18] TRALLERO, José Luis. *Oil-water Flow Patterns in Horizontal Pipes*. Tulsa, 1995. Disertační práce. University of Tulsa.
- [19] TRALLERO, J.L., C. SARICA a J.P. BRILL. A Study of Oil-Water Flow Patterns in Horizontal Pipes. *SPE Production & Facilities* [online]. 1997, **12**(03), 165-172 [cit. 2021-03-11]. ISSN 1064-668X. Dostupné z: doi:10.2118/36609-PA
- [20] Ansys Fluent 12.0 User's Guide. ENEA [online]. 2009 [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: [https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/main\\_pre.htm](https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/main_pre.htm)

- [21] Fázové rovnováhy – dvousložkové soustavy kapalina-kapalina. In: *Nebezpečné chemické látky a přípravky* [online]. 2014 [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: [http://chemikalie.upol.cz/skripta/fch/FazRov\\_1+1.pdf](http://chemikalie.upol.cz/skripta/fch/FazRov_1+1.pdf)
- [22] Fázové rozhraní. *Fyzikální chemie* [online]. [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: <http://fch-ped.bartovsky.eu/koloidy/texty/01-FazoveRozhrani.pdf>
- [23] Hustota kapalin. *ConVERTER* [online]. 2002 [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/hustota-kapalin.html>
- [24] Kamery PIV. <https://www.lavision.de/en/techniques/piv-ptv/>
- [25] Povrchové napětí. *ConVERTER* [online]. 2020 [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/povrchove-napeti.html>
- [26] SF800-LOW PRESSURE FLOW METER. *Swissflow BV* [online]. [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: <http://www.swissflow.com/sf800.html>
- [27] *Springer handbook of experimental fluid mechanics*. Editor Cameron TROPEA, editor Alexander L. YARIN, editor John F. FOSS. Berlin: Springer, c2007. ISBN 978-3-540-25141-5.
- [28] Viskozita vody v závislosti na teplotě. *ConVERTER* [online]. 2002 [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/viskozita-vody.html>

## Seznam symbolů

$\alpha$	smáčivost	[N/m]
$\gamma$	povrchová energie	[J/m <sup>2</sup> ]
$\varepsilon$	absolutní drsnost potrubí	[m]
$\mu$	dynamická viskozita	[kg/ms]
$\mu_v$	dynamická viskozita vody	[kg/ms]
$\mu_o$	dynamická viskozita oleje	[kg/ms]
$\mu_s$	dynamická viskozita směsi	[kg/ms]
$\rho$	hustota	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_o$	hustota oleje	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_v$	hustota vody	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_s$	hustota směsi	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\tau_p$	reakční čas částice	[s]
$\tau_f$	charakteristické časové měřítko	[s]
$A$	nově vzniklý povrh	[m <sup>2</sup> ]
$C_s$	rozptyl průřezu	[m]
$C_v$	objemový podíl vody	[-]
$D$	průřez potrubí	[m]
$d_s$	průměr částic	[m]
$E_o$	Eötvösovo číslo	[-]
$f$	počet fází	[-]
$Fr_s$	Froudeho číslo směsi	[-]
$g$	gravitační zrychlení	[m/s <sup>2</sup> ]
$I_0$	intenzita laseru	[W/m <sup>2</sup> ]
$P_s$	celková rozptýlená energie	[J]
$Re_s$	Reynoldsovo číslo směsi	[-]
$s$	počet kapalin	[-]
$Stk$	Stokesovo číslo	[-]
$U_v$	rychlost vody	[m/s <sup>1</sup> ]
$U_o$	rychlost oleje	[m/s <sup>1</sup> ]
$U_s$	rychlost směsi	[m/s <sup>1</sup> ]
$v$	počet neznámých	[-]
$W^s$	práce potřebná k zvětšení povrchu kapalné fáze	[J]

## Seznam obrázků

<b>Obr. 1:</b> Závislost velikosti plochy fázového rozhraní A na poloměru r a počtu částic v [22]	11
<b>Obr. 2:</b> Molekula v rozhraní a v objemové fázi [22]	12
<b>Obr. 3:</b> Izobarický fázový diagram dvousložkové soustavy dvou neomezeně mísitelných kapalin [21]	13
<b>Obr. 4:</b> Izobarický fázový diagram dvousložkové soustavy dvou omezeně mísitelných kapalin [21]	14
<b>Obr. 5:</b> Izobarický fázový diagram dvousložkové soustavy dvou omezeně mísitelných kapalin s plynnou fází [21]	15
<b>Obr. 6:</b> Izobarický fázový diagram dvousložkové soustavy dvou nemísitelných kapalin s plynnou fází [21]	15
<b>Obr. 7:</b> Rozvrstvený tok [11]	16
<b>Obr. 8:</b> Rozvrstvený tok s mícháním na rozhraní [11]	17
<b>Obr. 9:</b> Disperze oleje ve vodě s vodní fází [11]	17
<b>Obr. 10:</b> Disperze oleje ve vodě [11]	17
<b>Obr. 11:</b> Disperze vody v oleji s olejovou fází [11]	18
<b>Obr. 12:</b> Disperze vody v oleji [11]	18
<b>Obr. 13:</b> Duální kontinuální tok [11]	18
<b>Obr. 14:</b> Přerušovaný tok [11]	18
<b>Obr. 15:</b> Prstencový tok [11]	19
<b>Obr. 16:</b> Univerzální mapa režimů toku [11,14]	22
<b>Obr. 17:</b> Schéma měřicí tratě	24
<b>Obr. 18:</b> Fotografie přívodu kapalin	25
<b>Obr. 19:</b> Fotografie separační nádrže	25
<b>Obr. 20:</b> Fotografie vyrobeného t-kusu	25
<b>Obr. 21:</b> Fotografie t-kusu v provozu	26
<b>Obr. 22:</b> Diferenční tlakoměr Camille Bauer Newport DP 705	26
<b>Obr. 23:</b> Fotografie rozvrstveného toku s hladkým rozhraním	27
<b>Obr. 24:</b> Fotografie rozvrstveného toku s vlnitým rozhraním	27
<b>Obr. 25:</b> Fotografie třívrstvého toku	27
<b>Obr. 26:</b> Fotografie disperzního toku	27
<b>Obr. 27:</b> Závislosti režimu toku na vstupních rychlostech oleje a vody	29
<b>Obr. 28:</b> Rozdíl mezi umístěním rozvrstveného toku s hladkým rozhraním	30
<b>Obr. 29:</b> Porovnání rozvrstveného toku s vlnitým rozhraním pro různé vstupní rychlosti oleje	31
<b>Obr. 30:</b> Přechod z rozvrstveného toku na disperzní tok	32
<b>Obr. 31:</b> Závislosti režimu toku na objemovém podílu vody a směsi	33
<b>Obr. 32:</b> Bezrozměrná mapa režimů toku	34
<b>Obr. 33:</b> t-kus použitý na trati 1 (vlevo), t-kus použitý na trati 2 (vpravo) [14]	35
<b>Obr. 34:</b> Bezrozměrná mapa režimů toku s oblastí obráceného nátoku oleje	36
<b>Obr. 35:</b> Mapa režimů toku s nátokem zespodu [14]	37

<b>Obr. 36:</b> 2C-PIV [4]	38
<b>Obr. 37:</b> Rozptyl světla pro 1 $\mu\text{m}$ skleněnou částici ve vodě [16]	40
<b>Obr. 38:</b> Rozptyl světla pro 10 $\mu\text{m}$ skleněnou částici ve vodě [16]	40
<b>Obr. 39:</b> Rozptyl světla pro 30 $\mu\text{m}$ skleněnou částici ve vodě [16]	40
<b>Obr. 40:</b> Schématický diagram laseru [16]	42
<b>Obr. 41:</b> Technika více časových okamžiků na jednom snímku [16]	43
<b>Obr. 42:</b> Technika jednoho časového okamžiku na jednom snímku [16]	43
<b>Obr. 43:</b> Základní nastavení stereoskopického PIV a) Translační metoda b) Technika úhlového posunutí [16]	45
<b>Obr. 44:</b> Uspořádání experimentu a měřicího systému [9]	46
<b>Obr. 45:</b> Mapa PIV měření	47
<b>Obr. 46:</b> Vyfocené fotografie 1) olejová část 2) vodní část [9]	47
<b>Obr. 47:</b> Průběh vektorů rychlostí ve vodě pro rozvrstvené tok s hladkým rozhraním [9]	48
<b>Obr. 48:</b> Průběh vektorů rychlostí v oleji pro rozvrstvené tok s hladkým rozhraním [9]	48
<b>Obr. 49:</b> Průběh vektorů rychlostí ve vodě pro rozvrstvené tok s vlnitým rozhraním [9]	49
<b>Obr. 50:</b> Průběh vektorů rychlostí v oleji pro rozvrstvené tok s vlnitým rozhraním [9]	50
<b>Obr. 51:</b> Průběh vektorů rychlostí ve vodě pro třívrstvý tok [9]	50
<b>Obr. 52:</b> Průběh vektorů rychlostí v oleji pro třívrstvý tok [9]	51
<b>Obr. 53:</b> Rozměry domény	52
<b>Obr. 54:</b> 2D mesh	53
<b>Obr. 55:</b> 3D mesh	53
<b>Obr. 56:</b> Typ režimu toku	54
<b>Obr. 57:</b> 3D simulace – Vstupní část	55
<b>Obr. 58:</b> 3D simulace – Vznik nepravidelných vln	55
<b>Obr. 59:</b> 3D simulace – Vznik větších vln	55
<b>Obr. 60:</b> 3D simulace – Průřezy potrubí	55
<b>Obr. 61:</b> 2D simulace s nátokem shora– Vstupní část	56
<b>Obr. 62:</b> 2D simulace s nátokem shora– Vznik nepravidelných vln	56
<b>Obr. 63:</b> 2D simulace s nátokem shora – Vznik větších vln	56
<b>Obr. 64:</b> 2D simulace s nátokem zespodu – Vstupní část	56
<b>Obr. 65:</b> 2D simulace s nátokem zespodu – Vznik vlnění	57
<b>Obr. 66:</b> 2D simulace s nátokem zespodu – Průběh vlnění	57
<b>Obr. 67:</b> 2D simulace s nátokem zespodu – Koncová část potrubí	57
<b>Obr. 68:</b> 2D simulace s nátokem zespodu – Detail	57
<b>Obr. 69:</b> Experimentální pozorovaná při nátoku zespodu [10]	57
<b>Obr. 70:</b> Průběh vektorů rychlosti v oleji	58
<b>Obr. 71:</b> Průběh vektorů rychlosti ve vodě	59
<b>Obr. 72:</b> Průběh vektorů ve 2D	59
<b>Obr. 73:</b> Průběh vektorů ve 3D	60
<b>Obr. 74:</b> Srovnání jednotlivých řešení	61

## Seznam tabulek

<b>Tab. 1:</b> Bezrozměrná kritéria pro proudění nemísitelných kapalin v potrubí [11,14]	21
<b>Tab. 2:</b> Fyzikální vlastnosti použitých kapalin [14,23,25,28]	23
<b>Tab. 3:</b> Přibližné hodnoty rozptylu průřezu pro různé průměry olejových částic ve vzduchu [16]	40
<b>Tab. 4:</b> Typ částic pro proudění v kapalině [16]	41
<b>Tab. 5:</b> Typ částic pro proudění v plynu [16]	41
<b>Tab. 6:</b> Vybrané hodnoty rychlostí z experimentálního pozorování	52
<b>Tab. 7:</b> Parametry 2D sítě	53
<b>Tab. 8:</b> Parametry 3D sítě	53